



TUGAS AKHIR (TM-141585)

STUDI NUMERIK ALIRAN *COMPRESSED NATURAL GAS* MELEWATI *PIPELINE* SELAMA PROSES PENGISIAN *TUBE SKID* DI *STORAGE PLANT* (STUDI KASUS DI PT. PJB UP MUARA TAWAR)

ARDIAN PUJI NOVIATMOKO
NRP 2110 100 063

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.
NIP 196604021989031002

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



FINAL PROJECT (TM-141585)

**NUMERICAL STUDY OF COMPRESSED NATURAL
GAS THROUGH PIPELINE FOR TUBE SKID
FILLING PROCESS IN STORAGE PLANT (CASE
STUDY IN PT. PJB UP MUARA TAWAR)**

ARDIAN PUJI NOVIATMOKO
NRP 2110 100 063

Academic Advisor
Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.
NIP 196604021989031002

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016

**STUDI NUMERIK ALIRAN COMPRESSED
NATURAL GAS MELEWATI PIPELINE SELAMA
PROSES PENGISIAN TUBE SKID DI STORAGE
PLANT
(STUDI KASUS DI PT. PJB UP MUARA TAWAR)**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ARDIAN PUJI NOVIATMOKO

NRP. 2110 100 063

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc(Pembimbing)
(NIP. 196604021989031002)
2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng(Penguji I)
(NIP. 195310191979031002)
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT(Penguji II)
(NIP. 197104051997021001)
4. Ary Bachtiar Khrisna P., ST, MT, Ph.D(Penguji III)
(NIP. 197105241997021001)

**SURABAYA
JULI, 2016**

**STUDI NUMERIK ALIRAN COMPRESSED
NATURAL GAS MELEWATI PIPELINE SELAMA
PROSES PENGISIAN TUBE SKID DI STORAGE
PLANT (STUDI KASUS DI PT. PJB UP MUARA
TAWAR)**

Nama Mahasiswa : Ardian Puji Noviatmoko
NRP : 2110100063
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc

ABSTRAK

Compressed Natural Gas (CNG) adalah bahan bakar alternatif yang sedang dikembangkan untuk menggantikan bahan bakar minyak. Bahan bakar ini dianggap lebih bersih jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak karena emisi gas buangnya yang ramah lingkungan. CNG dibuat dengan melakukan kompresi gas metana (CH_4) yang diekstrak dari gas alam. CNG didistribusikan melewati pipeline dan kemudian disimpan dalam suatu baja tekan yang didesain sedemikian rupa sehingga mampu menyimpan gas bertekanan sampai 250 barg tersebut. Pemerintah Indonesia, dalam hal ini PT PJB telah membangun CNG storage plant di Muara Tawar, Bekasi, Jawa Barat pada tahun 2013. Storage plant tersebut mulai beroperasi pada tahun 2014. Dasar pembangunan CNG storage plant ini adalah untuk menyimpan sementara kelebihan supply gas pada waktu beban rendah, sehingga dapat memenuhi kebutuhan gas pada saat beban puncak. Adapun permasalahan yang ada pada saat ini adalah ketika proses pengisian tube skid sedang berlangsung, terdapat beberapa compressor yang mengalami shutdown secara tiba-tiba.

Penelitian ini dilakukan melalui studi computational fluid dynamicS menggunakan software GAMBIT 2.4.6 dalam tahapan pembuatan domain dan pembuatan mesh. Selanjutnya domain yang telah dibuat disimulasikan menggunakan software ANSYS

Fluent 14. Sebelum dilakukan simulasi, dilakukan pengumpulan data berupa layout, dimensi pipa, dan data operasional. Data-data tersebut digunakan sebagai dasar pembuatan domain dan acuan kondisi operasional dalam proses simulasi. Simulasi dilakukan di sepanjang pipa dari discharge kompresor sampai outlet header secara 3 dimensi menggunakan pemodelan ideal gas, dengan fluida kerja yang digunakan adalah metana. Model turbulensi yang digunakan adalah realizable k- ϵ . Selanjutnya simulasi dilakukan secara diskrit, di mana besar tekanan pada outlet header divariasikan antara 5 barg, 15 barg, 200 barg, 220 barg, 240 barg, dan 250 barg.

Dari hasil simulasi diperoleh hasil bahwa besar pressure drop yang terjadi pada aliran gas berbanding lurus terhadap jarak kompresor. Semakin jauh kompresor dari outlet header, semakin besar pressure drop yang terjadi pada aliran gas. Pressure drop terbesar bernilai 1484.27 mbarg, ketika tekanan outlet header 5 barg dan terjadi pada aliran gas yang dikompresi oleh kompresor nomor 2 dengan jarak 21.73 meter dari outlet header. Hasil selanjutnya dari simulasi ini adalah besar pressure drop yang terjadi pada aliran berbanding terbalik dengan tekanan yang terjadi pada kompresor. Pada tekanan kompresor terendah yaitu 5.39 barg, pressure drop yang terjadi pada aliran adalah sebesar 931.29 mbar. Sedangkan pada tekanan kompresor tertinggi yaitu 250.038 barg, pressure drop yang terjadi pada aliran gas justru lebih kecil yaitu 37.84 mbarg. Selain itu dari penelitian ini juga diperoleh hasil bahwa peningkatan pressure drop pada aliran sebanding dengan kecepatan aliran ketika melewati pipeline. Pressure drop terendah yang terjadi pada aliran gas adalah 26.6 mbarg dan pada kondisi tersebut kecepatan aliran gas melewati pipeline adalah sebesar 2.73 m/s. Sedangkan ketika pressure drop yang terjadi pada aliran sebesar 1484.27 mbarg, kecepatan aliran meningkat menjadi 91.098 m/s.

Kata kunci : Computational fluid dynamics, compressed natural gas, pipeline, pressure drop.

NUMERICAL STUDY OF COMPRESSED NATURAL GAS THROUGH PIPELINE FOR TUBE SKID FILLING PROCESS IN STORAGE PLANT (CASE STUDY IN PT. PJB UP MUARA TAWAR)

Student name : Ardian Puji Noviatmoko
NRP : 2110100063
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Academic advisor : Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc

ABSTRACT

Compressed Natural Gas (CNG) is an alternative fuel that is being developed to replace fossil fuels. It is considered cleaner than the fossil fuel because its emission gas is eco-friendly. CNG is made by compressing methane (CH₄), which is extracted from natural gas. CNG distributed through the pipeline and then stored in pressure vessels which are designed to be able to store up to 250 barg. PT. Pembangkitan Jawa Bali (PJB) has built CNG storage plant in Muara Tawar, Bekasi, West Java in 2013. The storage plant has begun operating in 2014. The main purpose of constructing the CNG storage plant is to store the surplus of gas supply temporarily at normal loads, so it can be used during peak loads. But there is a problem when the compression process is ongoing. The problem is several compressors get tripping although the storage's pressure have not reach 250 barg yet.

This research was conducted based on numerical study using computational fluid dynamics (CFD) software. Software GAMBIT 2.4.6 was used to make and to mesh the domain. ANSYS FLUENT 14 was choosen to run the simulation process. Data for simulation process based on operational conditions from PT PJB UP Muara Tawar. Simulations conducted along the pipe from the compressor discharge to the outlet header using 3D and ideal gas. The fluid is methane. Realizable k- ϵ turbulence models was selected to give the effect of turbulence. The pressure on the

outlet header was varied between 5 barg , 15 barg , 200 barg , 220 barg , 240 barg and 250 barg.

The result from the simulation showed that the increasing of pressure drop in the gas flow is proportional to the distance of the compressor. If the compressor is located farther away from the outlet header, the pressure drop that occurred, will be higher. The highest pressure drop in gas flow is 1484.27 mbarg, when the outlet header pressure is 5 barg and it occurred in the gas flow which was compressed by the compressor number 2 with a distance of 21.73 meters from the outlet header. Based on the results of the simulation, pressure drop that occurred in the gas flow was inversely to the pressure on the compressor. When the pressure of compressor was 5.39 barg, pressure drop that occurred in the gas flow was 931.29 mbar. The smaller pressure drop occurred in the gas flow when the compressor discharge pressure compressor was 250.038 barg. The pressure drop was only 37.84 mbarg. The another result from this numerical simulation also showed that the increasing of the pressure drop was proportional to the velocity of gas flow through the pipeline. The lowest pressure drop that occurred in the gas flow was 26.6 mbarg and at this condition the velocity of gas flow through the pipeline was 2.73 m/s. Whereas, when the pressure drop that occurred in the gas flow was 1484.27 mbarg, the velocity increased to be 91.098 m/s.

Keywords: *Computational fluid dynamics, compressed natural gas, pipeline, pressure drop.*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Natural Gas.....	7
2.2 Compressed Natural Gas	8
2.3 Aliran Fluida di Dalam Pipa.....	10
2.4 Perhitungan Head Loss	11
2.5 Sistem Perpipaan	14
2.6 Studi Numerik CFD.....	16
2.7 Dasar Persamaan RANS.....	17
2.8 Pemodelan Real Gas.....	19
2.9 Penelitian Terdahulu.....	22
BAB III METODOLOGI	29
3.1 Tahapan Penelitian	29
3.2 Flowchart Penelitian	30
3.3 Tahapan Pemodelan dan Simulasi.....	30
3.3.1 Pre-processing.....	30
3.3.2 Processing	34
3.3.3 Post-Processing	37
BAB IV HASIL DAN ANALISA DATA	39
4.1 Validasi Hasil Simulasi	39

4.2 Posisi Pengamatan Hasil Simulasi.....	40
4.3 Analisa <i>Pressure Drop</i> Aliran	41
4.4 Analisa Tekanan yang Dihasilkan oleh Masing-masing Kompresor	43
4.4.1 Variasi Tekanan <i>Outlet Header</i> 5 barg	43
4.4.2 Variasi Tekanan <i>Outlet Header</i> 15 barg.....	47
4.4.3 Variasi Tekanan <i>Outlet Header</i> 200 barg.....	50
4.4.4 Variasi Tekanan <i>Outlet Header</i> 220 barg.....	53
4.4.5 Variasi Tekanan <i>Outlet Header</i> 240 barg.....	57
4.4.6 Variasi Tekanan <i>Outlet Header</i> 250 barg.....	60
4.5 Analisa Perubahan Kecepatan Aliran	64
4.6 Analisa Visualisasi Vektor Kecepatan dari Aliran Ketika Memasuki <i>Header</i>	66
4.7 Pengaruh Perubahan Tekanan Aliran Terhadap Kecepatan Aliran di <i>Outlet Header</i>	68
4.8 Pengaruh Perubahan Tekanan Aliran Terhadap <i>Mass</i> <i>Flow Rate</i> di <i>Outlet Header</i>	71
4.9 Perhitungan Daya Kompresor	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran.....	76
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel kekasaran (e) material pipa 1
Tabel 2.2	<i>Physical constants</i> komponen penyusul gas alam 21
Tabel 3.1	Hasil <i>grid independency test</i> 38
Tabel 4.1	Hasil <i>grid independency test</i> 39
Tabel 4.2	Validasi hasil simulasi..... 40
Tabel 4.3	Perbandingan <i>pressure drop</i> pada masing masing kompresor untuk variasi tekanan 5 barg..... 47
Tabel 4.4	Perbandingan <i>pressure drop</i> pada masing masing kompresor untuk variasi tekanan 15 barg..... 50
Tabel 4.5	Perbandingan <i>pressure drop</i> pada masing masing kompresor untuk variasi tekanan 200 barg..... 53
Tabel 4.6	Perbandingan <i>pressure drop</i> pada masing masing kompresor untuk variasi tekanan 220 barg..... 57
Tabel 4.7	Perbandingan <i>pressure drop</i> pada masing masing kompresor untuk variasi tekanan 240 barg..... 60
Tabel 4.8	Perbandingan <i>pressure drop</i> pada masing masing kompresor untuk variasi tekanan 250 barg..... 63

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perkembangan konsumsi minyak bumi di Indonesia berdasarkan sektor.....	7
Gambar 2.2	Proses pengisian CNG di <i>mother station</i>	10
Gambar 2.3	<i>Moody friction factor diagram</i>	13
Gambar 2.4	Blok diagram CFD.....	17
Gambar 2.5	Standard gas compressibility factor chart.....	21
Gambar 2.6	Skema <i>experimental decompression tube</i> (Evgenie Burlutsky,2012).....	23
Gambar 2.7	Domain <i>decompression tube</i> (Evgenie Burlutsky,2012)	23
Gambar 2.8	Distribusi tekanan pada posisi masing-masing pressure transducer (Evgenie Burlutsky,2012) .	24
Gambar 2.9	Struktur dari <i>gas transportation system</i> (Noorbehest,2013)	25
Gambar 2.10	Domain aliran dan <i>boundary conditions</i> (Noorbehest,2013).....	25
Gambar 2.11	Perubahan tekanan <i>outlet</i> setelah kegagalan kompresor nomor 7 (Noorbehest,2013).....	26
Gambar 2.12	Perubahan <i>outlet pressure</i> ketika flow rate berubah (Noorbehest,2013)	27
Gambar 3.1	Flowchart penelitian	31
Gambar 3.2	<i>Layout CNG storage plant</i> Muara Tawar	32
Gambar 3.3	Domain dan <i>boundary conditions pipeline</i>	33
Gambar 3.4	<i>Meshing</i> pada domain	34
Gambar 4.1	Grafik <i>pressure drop</i> fungsi jarak kompresor .	41
Gambar 4.2	Kontur tekanan sepanjang <i>pipeline</i> variasi tekanan outlet header 5 barg.....	45
Gambar 4.3	Grafik tekanan <i>discharge</i> kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan di <i>outlet header</i> 5 barg	46

Gambar 4.4	Kontur tekanan sepanjang <i>pipeline</i> variasi tekanan outlet header 15 barg.....	48
Gambar 4.5	Grafik tekanan <i>discharge</i> kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan di <i>outlet header</i> 15 barg	49
Gambar 4.6	Kontur tekanan sepanjang <i>pipeline</i> variasi tekanan outlet header 200 barg.....	52
Gambar 4.7	Grafik tekanan <i>discharge</i> kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan di <i>outlet header</i> 200 barg	53
Gambar 4.8	Kontur tekanan sepanjang <i>pipeline</i> variasi tekanan outlet header 220 barg.....	55
Gambar 4.9	Grafik tekanan <i>discharge</i> kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan di <i>outlet header</i> 220 barg	56
Gambar 4.10	Kontur tekanan sepanjang <i>pipeline</i> variasi tekanan outlet header 240 barg.....	59
Gambar 4.11	Grafik tekanan <i>discharge</i> kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan di <i>outlet header</i> 240 barg	60
Gambar 4.12	Kontur tekanan sepanjang <i>pipeline</i> variasi tekanan outlet header 250 barg.....	61
Gambar 4.13	Grafik tekanan <i>discharge</i> kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan di <i>outlet header</i> 250 barg	63
Gambar 4.14	Grafik kecepatan aliran gas fungsi <i>pressure drop</i>	64
Gambar 4.15	Visualisasi vektor kecepatan aliran di <i>header</i> Ketika tekanan <i>outlet header</i> 5 barg	66
Gambar 4.16	Visualisasi vektor kecepatan aliran di <i>header</i> Ketika tekanan <i>outlet header</i> 15 barg	67
Gambar 4.17	Visualisasi vector kecepatan aliran di <i>header</i> Ketika tekanan <i>outlet header</i> 250 barg	67
Gambar 4.18	Grafik kecepatan aliran di <i>outlet header</i> fungsi perubahan <i>pressure drop</i>	70

Gambar 4.19	Grafik <i>mass flow rate</i> di <i>outlet header</i> fungsi <i>pressure drop</i>	71
Gambar 4.20	Grafik daya yang diperlukan masing-masing kompresor.....	73

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Gas bumi adalah suatu campuran hidrokarbon dengan gas metana sebagai komponen terbanyak. Gas bumi dapat dijumpai dalam *reservoir* minyak bumi sebagai *associated gas* yang bergabung dengan minyak bumi. Selain itu gas bumi juga dapat ditemukan dalam sumur gas tanpa kandungan minyak bumi sebagai *non-associated gas*. Pada saat ini, gas bumi memiliki peranan penting dalam kehidupan, baik itu sebagai sumber energi maupun sebagai suatu bahan dasar untuk industri petrokimia. Produksi gas nasional pada 2007 adalah sekitar 8.134,6 MMSCFD dan 41,6 % volume gas tersebut telah dipakai untuk keperluan domestik sebagai bahan baku industri petrokimia, bahan bakar gas untuk rumah tangga (*liquefied petroleum gas*), dan bahan bakar pembangkit tenaga listrik (*compressed natural gas*). Sedangkan 58,4% volume sisanya diekspor sebagai *liquefied natural gas*.

Sekitar 30 tahun silam, energi gas bumi belum diperhatikan sebagai salah satu sumber energi yang dapat mendorong pertumbuhan perekonomian dalam negeri. Seiring dengan menipisnya bahan bakar minyak dan semakin lengkapnya infrastruktur pipa gas, konsumsi gas juga semakin diminati masyarakat, baik itu untuk keperluan rumah tangga ataupun industri. Bahkan kini, saat kenaikan harga minyak terus meroket dan bertengger di kisaran US\$ 140 per barel, mau tidak mau pemerintah mendorong pemakaian gas dalam berbagai sektor, khususnya dalam dunia industri. Pasalnya, dengan bahan baku atau bahan bakar gas, maka ongkos produksi industri jauh lebih hemat dibandingkan dengan memakai bahan bakar minyak. Kenyataanya ini tidak mengherankan, sebab selain sumber energi ini bersih, harga yang ditawarkannya pun lebih murah jika dibanding industri menggunakan bahan bakar minyak.

Compressed Natural Gas (CNG) adalah alternatif bahan bakar yang sedang dikembangkan untuk menggantikan bahan bakar minyak. Bahan bakar ini dianggap lebih bersih jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak karena emisi gas buangnya yang ramah lingkungan. CNG dibuat dengan melakukan kompresi metana (CH_4) yang diekstrak dari gas alam. CNG disimpan dan didistribusikan dalam suatu baja tekan yang didesain sedemikian rupa sehingga mampu menyimpan gas bertekanan sampai 250 barg tersebut. Pengisian CNG dapat dilakukan dengan dari sistem bertekanan rendah maupun bertekanan tinggi. Perbedaan dari kedua sistem tersebut terletak pada biaya pembangunan stasiun dan lamanya pengisian bahan bakar.

Pemerintah Indonesia, dalam hal ini PT. PJB telah membangun CNG *storage plant* di Muara Tawar, Bekasi, Jawa Barat pada tahun 2013. *Storage plant* tersebut mulai beroperasi pada tahun 2014. Dasar pembangunan CNG *storage plant* ini adalah untuk menyimpan sementara kelebihan *supply gas* pada waktu beban rendah. Hal ini dilakukan untuk memenuhi kebutuhan gas pada saat beban puncak. Pada CNG *storage plant* Muara Tawar ini terdapat 140 unit CNG *Storage Tube Skid*, di mana masing-masing unit terdiri dari 8 *tubes* dengan volume per *tube* sebesar $2,24 \text{ m}^3$. Pengelompokan CNG *Storage Tube Skid* ini dibagi menjadi 4 blok, 3 blok berisi 36 unit *skid* dan 1 blok berisi 32 unit *skid*. *Tube skid* ini seluruhnya disusun dalam 4 tingkat. Dengan pembangunan *storage plant* konsumsi bahan bakar minyak dapat ditekan sampai 203 ribu kiloliter pada saat *peak load* sehingga biaya produksi dapat dihemat sekitar Rp 1,187 triliun per tahun.

Proses pemampatan *natural gas* dilakukan selama 10 jam oleh *compressor* hingga tekanan mencapai 250 bar kemudian disimpan ke dalam CNG *storage cylinder* dan kemudian didekompresi selama 9 jam untuk keperluan bahan bakar PLTG / PLTGU UP Muara Tawar. Pada tahap awal, gas yang berasal dari PGN dengan tekanan normal 24 bar masuk melalui *Plant Inlet*

Control. Plant Inlet Control ini mempunyai fungsi utama sebagai *flow limiter* untuk membatasi aliran gas yang masuk ke dalam CNG Plant dengan aliran maksimum gas sebesar 2 MMSCFH. *Flow Limiter* ini juga berfungsi sebagai *Plant Inlet Control / Shutdown. Plant Inlet Control* ini terdiri dari *Shutdown Valve (Pneumatic Operated)*, *Orifice Flow Meter*, dan *Flow Control Valve*. *Shutdown Valve* berfungsi sebagai *safety plant* jika terjadi hal yang tidak diinginkan. *Orifice Flow Meter* memiliki fungsi untuk mengetahui aliran gas yang masuk ke dalam *plant* sehingga dapat dimonitor. Sedangkan *Flow Control Valve* digunakan untuk membatasi aliran dengan mengatur bukaan dari *control valve* tersebut. Kemudian setelah itu gas masuk ke *Pre-Treatment Unit* yang terdiri dari dua komponen utama yaitu *Scrubber* dan *filter*. Di *Pre-Treatment* ini gas akan dibersihkan dari kotoran-kotoran yang terkandung dalam gas berupa partikel-partikel *solid* maupun *liquid* sehingga tidak membahayakan *operational equipment* lainnya terutama pada proses kompresi di CNG Compressor. Setelah melalui *Gas Pre-Treatment Unit*, gas masuk ke *Gas Dryer Unit* untuk mengurangi kadar air yang terkandung dalam gas tersebut sehingga gas yang masuk ke CNG Compressor benar-benar kering dan mengandung *water content* yang rendah. Selanjutnya gas dikompresi menggunakan CNG Compressor yang digerakkan menggunakan motor listrik hingga tekanan gas mencapai 250 bar. Pada saat proses kompresi, gas yang berasal dari PGN diturunkan tekanannya terlebih dahulu dengan menggunakan *pressure regulator* yang terdapat pada kompresor dengan *range inlet* 10-14 barg. Pada tahap kompresi gas akan mengalami kenaikan temperatur seiring dengan kenaikan tekanan, sehingga dalam tahap ini digunakan *intercooler* di setiap stage proses kompresi yang terdapat pada kompresor untuk menjaga temperatur sesuai dengan yang digunakan. Setelah itu gas disimpan dalam CNG Storage Skid untuk digunakan pada saat beban puncak.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun permasalahan yang ada pada saat ini adalah ketika proses pengisian *tube skid* sedang berlangsung, terdapat beberapa *compressor* yang mengalami *shutdown* secara tiba-tiba. Hal tersebut tentu akan berpengaruh terhadap *flow rate* gas yang masuk ke *tube skid*, sehingga waktu pengisian *tube skid* akan lebih lama dari waktu yang direncanakan yaitu 10 jam. Dalam penelitian tugas akhir ini akan dilakukan simulasi tentang pengaruh posisi dan jarak kompresor dari *tube skid* terhadap besarnya *pressure drop* yang terjadi selama gas melewati *pipeline*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS Fluent 14. Dari simulasi tersebut akan diperoleh data-data mengenai besarnya perubahan tekanan selama proses pengisian berlangsung sehingga dapat diketahui kontribusi tekanan yang dihasilkan oleh masing - masing *compressor*.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menganalisa permasalahan di atas, terdapat beberapa batasan masalah yang diambil dalam penelitian ini, di antaranya :

1. Simulasi dilakukan sepanjang pipa mulai dari *outlet* kompresor sampai *header* secara 3 dimensi.
2. Data operasional yang digunakan diperoleh dari PT PJB UP Muara Tawar.
3. *Software* yang digunakan pada tahapan pembuatan geometri adalah *software* GAMBIT 2.4.6, sedangkan untuk tahapan simulasi menggunakan *software* ANSYS Fluent 14.
4. Fluida dianalisa sebagai *Ideal Gas*.
5. Keberadaan valve diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dengan adanya penelitian mengenai simulasi aliran *compressed natural gas* di dalam *pipeline* CNG *storage plant* PT PJB UP Muara Tawar adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui besarnya *pressure drop* aliran sepanjang *pipeline* mulai dari *outlet* kompresor sampai dengan *outlet header*.
2. Mengetahui pengaruh jarak dan posisi kompresor dari *outlet header* terhadap besarnya *pressure drop* aliran CNG pada *pipeline*.
3. Mengetahui pengaruh kenaikan tekanan yang dihasilkan kompresor terhadap besar *pressure drop* yang terjadi pada aliran CNG melewati *pipeline*.
4. Mengetahui daya yang diperlukan oleh masing – masing kompresor pada setiap kondisi variasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari hasil penelitian ini adalah dapat diketahui pengaruh jarak dan posisi kompresor terhadap besarnya *pressure drop* yang terjadi selama proses pengisian tube skid sehingga hasil penelitian dapat dijadikan sebagai referensi bagi pihak PT. PJB UP Muara Tawar dalam mendesain *pipeline* pada *storage plant*. Selain itu, dari hasil penelitian ini juga dapat memberikan pengetahuan dan pengalaman mengenai konsep studi CFD untuk simulasi pada aliran compressible gas pada *pipeline* dengan menggunakan *software* GAMBIT dan ANSYS FLUENT.

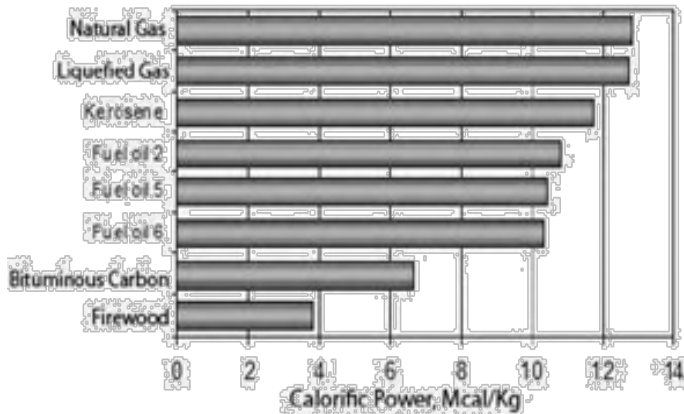
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Natural Gas

Natural gas merupakan bahan bakar dalam fase gas yang tidak berwarna, tidak beracun, lebih ringan daripada udara dan tidak mengandung *olefins* (hasil *hydrocarbons* selama proses distilasi). Pada umumnya, komponen utama penyusun natural gas adalah metana (CH_4), dengan kandungan di atas 85% dari volumenya. Metana merupakan molekul hidrokarbon rantai terpendek dan teringan. Selain metana, gas alam juga mengandung molekul – molekul hidrokarbon yang lebih berat seperti etana (C_2H_6), propana (C_3H_8), dan butane (C_4H_{10}). Natural gas memiliki nilai kalor per unit massa yang lebih besar dibandingkan dengan jenis bahan bakar lain.



Gambar 2.1 Nilai kalor dari beberapa jenis bahan bakar yang berbeda

Komposisi gas alam bervariasi sesuai dengan sumber ladang gasnya. Campuran organosulfur dan hidrogen sulfida adalah pengotor utama dari gas yang harus dipisahkan. Gas dengan jumlah pengotor sulfur yang signifikan dinamakan *sour*

gas dan sering disebut sebagai gas asam. Gas alam yang telah diproses dan akan dijual bersifat tidak berasa dan tidak berbau. Akan tetapi sebelum gas tersebut didistribusikan, biasanya gas tersebut diberi bau dengan menambahkan *thiol*, agar dapat terdeteksi bila terjadi kebocoran gas. Gas alam yang telah diproses itu sendiri sebenarnya tidak berbahaya, akan tetapi gas alam tanpa proses dapat menyebabkan tercekiknya pernafasan karena dapat mengurangi kandungan oksigen di udara pada level yang dapat membahayakan.

Gas alam merupakan campuran dari gas – gas yang sesuai digunakan sebagai bahan bakar berbentuk gas. Gas alam yang penting adalah gas alam yang berhubungan dengan minyak mentah yang diperoleh dari sumur minyak. Secara umum gas alam dalam sumur minyak dibagi menjadi dua jenis yaitu :

1. *Dry Gas* (Gas kering)

Jenis gas kering diperoleh dari sumur atau ladang yang tidak ada minyak mentahnya, Jenis ini tidak mengandung uap seperti gasoline. Komposisi gas kering pada umumnya adalah metana (CH_4) 96%, etana (C_2H_6) 0.8%, nitrogen (N_2) 3.2%.

2. *Wet Gas* (Gas basah)

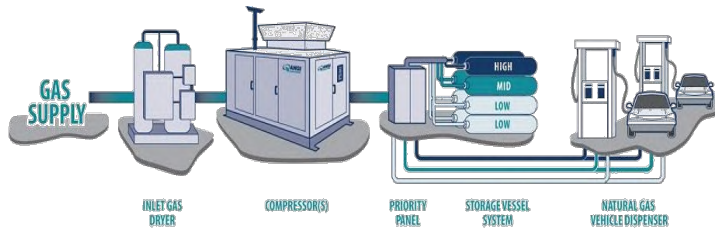
Gas yang diperoleh dari perolehan ladang minyak disebut gas alam basah. Gas ini mengandung metana dengan presentase yang tinggi. Selain itu gas basah juga mengandung n-propana, n-butana, iso-butana, iso-pentana, hydrogen, hydrogen sulfida, nitrogen, dan gasoline dalam prosentase yang rendah.

2.2 Compressed Natural Gas

Compressed Natural Gas (CNG) adalah alternatif bahan bakar yang sedang dikembangkan untuk menggantikan bahan bakar minyak. Bahan bakar ini dianggap lebih bersih jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak karena emisi gas buangnya yang ramah lingkungan. CNG dibuat dengan melakukan kompresi metana (CH_4) yang diekstrak dari gas alam. CNG disimpan dan didistribusikan dalam suatu baja tekan yang didesain sedemikian rupa sehingga mampu menyimpan gas

bertekanan sampai 250 bar tersebut. Pengisian CNG dapat dilakukan dengan sistem bertekanan rendah maupun bertekanan tinggi. Perbedaan dari kedua sistem tersebut terletak pada biaya pembangunan stasiun dan lamanya pengisian bahan bakar.

Proses pengisian CNG dilakukan di stasiun pengisian yang biasa disebut dengan *mother station*. Pada stasiun pengisian tersebut, gas alam yang dipasok dari beberapa *resource* dialirkan menuju ke *pre-treatment unit* yang terdiri dari dua komponen utama yaitu *Scrubber* dan *filter*. Di *pre-treatment* ini gas akan dibersihkan dari kotoran-kotoran yang terkandung dalam gas berupa partikel-partikel *solid* maupun *liquid* sehingga tidak membahayakan *operational equipment* lainnya terutama pada proses kompresi di CNG *Compressor*. Setelah melalui *gas pre-treatment unit*, gas masuk ke *gas dryer unit* untuk mengurangi kadar air yang terkandung dalam gas tersebut sehingga gas yang masuk ke CNG *Compressor* benar-benar kering dan mengandung *water content* yang rendah. Selanjutnya gas dikompresi menggunakan CNG *Compressor* yang digerakkan menggunakan motor listrik hingga tekanan gas mencapai 250 bar. Sebelum proses kompresi, gas alam diturunkan tekanannya terlebih dahulu dengan menggunakan *pressure regulator* yang terdapat pada kompresor dengan *range inlet* 10-14 bar. Pada tahap kompresi gas akan mengalami kenaikan temperatur seiring dengan kenaikan tekanan, sehingga dalam tahap ini digunakan *intercooler* di setiap *stage* proses kompresi yang terdapat pada kompresor untuk menjaga temperatur sesuai dengan yang digunakan. Setelah itu gas alam yang telah terkompresi tersebut disimpan pada suatu tabung penyimpanan CNG atau *Storage Skid* sehingga dapat didistribusikan dengan mudah ke tempat lain. Secara umum proses pengisian di *mother station* dapat dilihat pada gambar 2.2 di bawah ini



Gambar 2.2 Proses pengisian CNG di *mother station*

2.3 Aliran Fluida di dalam Pipa

Dalam sub bab ini akan dibahas mengenai faktor – faktor yang mempengaruhi tekanan dalam suatu aliran melewati sebuah pipa. Jika kita mengabaikan gaya gesek yang terjadi antara aliran fluida dengan dinding pipa, atau dengan kata lain kita asumsikan aliran *steady*, maka persamaan Bernoulli dapat digunakan untuk menghitung perubahan tekanan yang terjadi pada aliran. Berikut adalah persamaan Bernoulli

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constant} \quad \dots(2.1)$$

Dari persamaan 2.1 dapat kita lihat bahwa faktor – faktor yang mempengaruhi perubahan tekanan adalah

1. Perubahan luas penampang

Perubahan luas penampang pipa akan menyebabkan perubahan kecepatan. Semakin kecil luas penampang, kecepatan aliran fluida akan semakin meningkat.

2. Ketinggian pipa

Dengan adanya ketinggian pipa (*positive incline*), maka nilai z akan meningkat. Hal tersebut menyebabkan tekanan fluida akan menurun.

Dalam kenyataan, aliran fluida di dalam pipa dipengaruhi secara signifikan oleh gaya gesek antara fluida dengan dinding pipa. Aliran fluida di dalam pipa yang terjadi juga cenderung turbulen. Sehingga secara umum, selain kedua faktor di atas, *pressure drop* aliran fluida dipengaruhi secara signifikan oleh

friction antara fluida dan dinding pipa. Berdasarkan fakta tersebut, persamaan Bernoulli tidak sesuai jika diterapkan dalam aliran fluida di dalam pipa.

2.4 Perhitungan Head Loss

Total head loss merupakan penjumlahan dari *major losses* dan *minor losses*. *Major losses* disebabkan adanya *friction* sepanjang pipa. Sedangkan *minor losses* disebabkan oleh adanya *entrances*, sambungan, perubahan luas penampang, dan lain-lain. *Major head loss* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *energy balance* pada aliran fluida berikut.

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_{l_t} \quad \dots(2.2)$$

Dengan mengasumsikan bahwa aliran telah *fully developed*, $h_{l_m} = 0$, dan $\alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} = \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2}$, maka persamaan 2.2 berubah menjadi

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = g(z_2 - z_1) + h_l \quad \dots(2.3)$$

Dengan menganggap pipa horizontal, $z_2 = z_1$ maka persamaan 2.3 menjadi

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho} = h_l \quad \dots(2.4)$$

Berdasarkan persamaan 2.4, *head loss* dapat diartikan sebagai *pressure loss* akibat adanya *frictional effects* untuk aliran *fully developed* melintasi pipa horizontal dengan luas area yang tetap.

a. Aliran Laminar

Untuk aliran laminar, *pressure drop* dapat dihitung secara analitis dengan persamaan berikut

$$\Delta P = \frac{128\mu L Q}{\pi D^4} \quad \dots(2.5)$$

Dikarenakan $Q = A \cdot \bar{V}$, maka

$$\Delta P = \frac{128\mu L \bar{V} (\frac{\pi D^2}{4})}{\pi D^4} = 32 \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{D} \quad \dots(2.6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.6 ke persamaan 2.4, maka persamaan *headloss major* menjadi

$$h_l = 32 \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{\rho D} = \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \left(\frac{\mu}{\rho \bar{V} D} \right) = \left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad \dots(2.7)$$

b. Aliran Turbulen

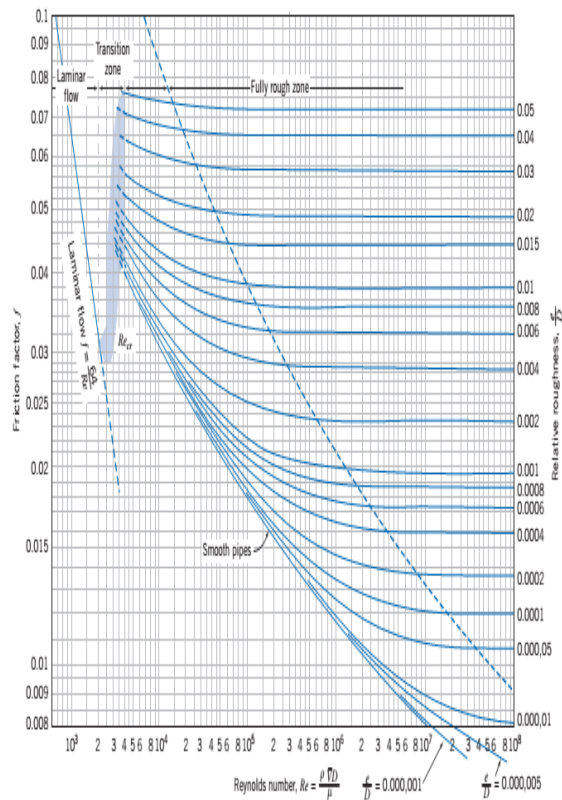
Dalam aliran turbulen, besar pressure drop yang terjadi tidak dapat dihitung secara analitis. Besar pressure hanya dapat didekati dengan pengamatan hasil eksperimen dan menggunakan *dimensional analysis* untuk menghubungkan hasil eksperimen tersebut. Untuk aliran turbulen, pressure drop disebabkan oleh gaya gesek yang merupakan fungsi diameter pipa, panjang pipa, kekasaran pipa, kecepatan aliran, densitas fluida, dan viskositas. Atau dapat ditulis sebagai berikut $\Delta P = \Delta P(D, L, e, v, \rho, \mu)$. Korelasi antara variabel – variabel tersebut adalah

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad \dots(2.8)$$

F adalah *friction factor* yang merupakan fungsi dari $\frac{e}{D}$ dan Reynolds Number. Untuk mencari f dapat dilakukan dengan menggunakan grafik *Moody friction factor* pada gambar 2.3. Sedangkan untuk nilai roughness, e , dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut

Tabel 2.1 Tabel kekasaran (e) untuk material pipa berbeda

Pipe	Roughness, e	
	Feet	Millimeters
Riveted steel	0.003–0.03	0.9–9
Concrete	0.001–0.01	0.3–3
Wood stave	0.0006–0.003	0.2–0.9
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Asphalted cast iron	0.0004	0.12
Commercial steel or wrought iron	0.00015	0.046
Drawn tubing	0.000005	0.0015

Gambar 2.3 *Moody Friction factor diagram*

2.5 Sistem Perpipaan

Pipa memiliki fungsi untuk mengalirkan fluida, baik itu cair atau gas dari satu atau beberapa titik menuju ke satu titik atau beberapa titik lainnya. Suatu sistem perpipaan merupakan gabungan-gabungan pipa yang memiliki panjang total relative pendek dan digunakan untuk mengalirkan fluida dari suatu peralatan ke peralatan lainnya yang beroperasi pada pada suatu *plant*. Sistem perpipaan dilengkapi dengan komponen-komponen seperti katup, *flanges*, belokan, percabangan, *nozzle*, *reducer*, tumpuan, gasket, dan lain-lain.

Pada dasarnya sistem perpipaan dan detail untuk setiap industri atau kilang tidaklah jauh berbeda, perbedaan-perbedaan mungkin terjadi hanya pada kondisi khusus atau batasan tertentu yang diminta pada setiap proyek. Banyak persamaan yang digunakan untuk menggambarkan aliran gas dalam suatu sistem perpipaan. Salah satu persamaan yang sering digunakan dalam suatu sistem perpipaan adalah *Rational Gas Flow Formula*. Persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

$$P_1^2 - P_2^2 = Bf \left(\frac{Z T G Q^2}{D^5} \right) L \quad \dots(2.9)$$

di mana ,

<i>B</i>	= dimensional constant (5608)
<i>D</i>	= diameter dalam pipa (mm)
<i>f</i>	= friction factor (dimensionless)
<i>L</i>	= panjang pipeline (km)
<i>G</i>	= gas gravity
<i>P</i> ₁	= initial line pressure (kg/cm ²)
<i>P</i> ₂	= final line pressure (kg/cm ²)
<i>Q</i>	= flow rate (m ³ /hr)
<i>T</i>	= temperature gas absolut (K)
<i>Z</i>	= compressibility factor (dimensionless)

Dalam pendesainan pipeline di PJB UP Muara Tawar, perhitungan pressure drop menggunakan persamaan API

Recommended Practice 14E section 4.2. Persamaan tersebut adalah sebagai berikut

$$\Delta P = 12.6 \frac{SQ^2 Z T f L}{p_1 d^5} \quad \dots(2.10)$$

di mana ,

S	= <i>specific gravity</i>
d	= <i>diameter dalam pipa (inchi)</i>
f	= <i>friction factor</i>
L	= <i>panjang pipeline (feet)</i>
P_1	= <i>upstream pressure (psia)</i>
Q	= <i>flow rate (MMSCFD)</i>
T	= <i>temperature gas absolut (°R)</i>
Z	= <i>compressibility factor</i>

Perhitungan *pressure drop* dengan menggunakan persamaan API Recommended Practice 14E section 4.2 hanya relevan jika diterapkan pada kondisi pipa yang horizontal. Sedangkan pada pipeline di PJB UP Muara Tawar, desain pipeline tidak hanya horizontal melainkan ada pipa – pipa yang terpasang secara vertikal. Berdasarkan hal tersebut, perhitungan *pressure drop* akan lebih sesuai dengan menggunakan *Modified General Flow Equations*. Persamaan tersebut adalah sebagai berikut

$$Q = 5.747 \times 10^{-4} F \left(\frac{T_b}{P_b} \right) \left(\frac{(P_1^2 - e^s P_2^2)}{G T_f L_e Z} \right)^{0.5} D^{2.5} \quad \dots(2.11)$$

$$L_e = \frac{L(e^s - 1)}{s} \quad \dots(2.12)$$

$$s = 0.0684 G \left(\frac{H_2 - H_1}{T_f Z} \right) \quad \dots(2.13)$$

di mana

Q	= <i>gas flow rate (m³/day)</i>
F	= <i>transmission factor (dimensionless)</i>

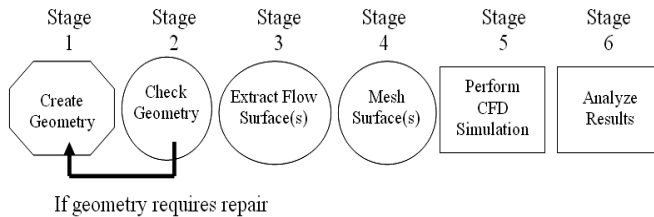
P_b	= base pressure (kPa)
T_b	= base temperature (K)
P_1	= upstream pressure (kPa)
P_2	= downstream pressure (kPa)
G	= gas gravity
T_f	= average gas temperature (K)
L_e	= equivalent length (km)
D	= diameter pipe (mm)
s	= elevation parameter (dimensionless)
H_1	= upstream elevation (m)
H_2	= downstream elevation (m)
e	= base of natural logarithm ($e = 2.718$)

2.6 Studi Numerik CFD

CFD merupakan cabang dari ilmu dinamika fluida yang memprediksikan aliran fluida, perpindahan panas, *mass transfer*, reaksi kimia, dan fenomena- fenomena lain pada fluida dengan menyelesaikan persamaan numerik dari persamaan pengendali (*governing equations*). *Governing equation* untuk dinamika fluida *Newtonian* dikenal dengan persamaan *Navier Stokes*. Dalam CFD, metode komputasi dilakukan dengan mengganti turunan parsial dari *governing equations* dengan persamaan aljabar yang lebih mudah untuk diselesaikan dengan computer.

Dalam analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida, perpindahan panas dan massa, dan lain-lainnya agar dapat melakukan interpretasi hasil-hasil simulasi. Sampai saat ini, CFD telah banyak digunakan dalam bidang aplikasi, baik itu untuk keperluan riset optimasi desain maupun aplikasi praktis. Hal ini dikarenakan CFD mampu merepresentasikan hasil pengujian yang dilakukan secara eksperimental dengan baik dan biaya yang diperlukan relatif lebih murah. Keuntungan lain dari penggunaan CFD adalah memudahkan analisa terhadap suatu kondisi yang tidak memungkinkan untuk dilakukan pengujian secara

eksperimental. Secara umum tahapan CFD dapat dilihat pada diagram di gambar 2.4.



Gambar 2.4 Blok diagram simulasi dengan CFD

Untuk menyelesaikan *governing equations* untuk suatu sistem aliran fluida, terdapat beberapa *software* yang digunakan dalam komputer, salah satu di antaranya adalah ANSYS FLUENT. *Software* ini memiliki memiliki efektifitas dan akurasi penggunaan yang sangat baik sehingga sering kali digunakan untuk proses simulasi. ANSYS FLUENT memberikan kapabilitas pemodelan untuk permasalahan aliran *incompressible*, *compressible*, laminar, maupun turbulen dengan menggunakan analisa secara *steady state* atau *transient*. Di dalam ANSYS FLUENT, model matematis untuk fenomena *transport* dikombinasikan dengan memodelkan geometri yang kompleks.

2.7 Dasar Persamaan RANS

Turbulensi merupakan gerakan tidak stabil ke segala arah yang terjadi pada fluida dengan *Reynolds number* (Re) yang tinggi. Secara teknis, jika pengkategorian suatu aliran didasarkan pada viskositas dari fluidanya, maka sebagian besar aliran akan bersifat turbulen. Kuantitas dari turbulensi itu sendiri pada dasarnya dipengaruhi oleh :

- Kombinasi dari momentum, massa, dan *species*
- Perpindahan panas
- Kerugian tekanan dan efisiensi
- Gaya pada bodi aerodinamis

Secara prinsip, ketika suatu turbulensi dideskripsikan sebagai persamaan *Navier-Stokes*, maka penyelesaian persamaan tidak memungkinkan dilakukan dengan menggunakan *direct numerical simulation (DNS)* karena akan membutuhkan kemampuan CPU yang tinggi. Untuk alasan tersebut, prosedur pemerataan diterapkan pada persamaan *Navier-Stokes* untuk memilah keseluruhan atau sebagian dari spektrum turbulensi. Prosedur pemerataan yang paling banyak digunakan adalah *Reynolds-averaging*, sehingga menghasilkan persamaan RANS. Dengan adanya proses tersebut, keseluruhan struktur turbulensi tereliminasi dari aliran sehingga dapat diperoleh variasi yang lebih baik dari kecepatan dan tekanan. Akan tetapi dengan adanya proses pemerataan juga menghasilkan ketentuan tambahan dalam persamaan *transport*, yakni *Reynold Stress and Fluxes* yang memerlukan penyelesaian dengan model turbulensi yang tepat.

Pada *Reynolds-averaging*, penyelesaian variabel pada persamaan *Navier-Stokes* didekomposisi menjadi komponen-komponen rata-rata dan fluktuatif. Untuk komponen kecepatan adalah sebagai berikut :

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad \dots(2.14)$$

di mana \bar{u}_i dan u'_i adalah komponen kecepatan rata – rata dan berfluktuasi ($i = 1,2,3$). Sedangkan untuk tekanan dan komponen skalar lainnya :

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad \dots(2.15)$$

di mana ϕ menyatakan sebuah besaran skalar seperti tekanan, energy, atau *species concentration*. Dengan mesubstitusikan bentuk persamaan 2.14 dan 2.15 untuk variable aliran pada persamaan momentum dan kontinuitas serta dengan pengambilan waktu rata-rata sehingga diperoleh *ensemble-averaging* dari persamaan kontinuitas dan momentum yang dapat dituliskan dalm bentuk *Cartesian* sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad \dots(2.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \end{aligned} \quad \dots(2.17)$$

Persamaan 2.16 dan 2.17 disebut sebagai persamaan RANS. Keduanya memiliki bentuk umum seperti halnya persamaan *Navier-Stokes*, dengan variable kecepatan dan variable penyelesaian lainnya direpresentasikan sebagai nilai ensemble-averaged atau time-averaged. Dari persamaan tersebut juga terdapat ketentuan tambahan yang merepresentasikan efek dari turbulensi. *Reynold stresses* harus dimodelkan terlebih dahulu agar mendekati persamaan 2.17. Dari data persamaan RANS tersebut akan diselesaikan secara komputasi pada ANSYS FLUENT.

2.8 Pemodelan *Real Gas*

Volume dari *real gas* biasanya lebih kecil daripada volume gas yang dimodelkan sebagai gas ideal. Perbandingan antara volume gas nyata dengan volume gas ideal pada tekanan dan temperature tertentu akan menghasilkan suatu bilangan tak berdimensi yang sering disebut dengan *compressibility factor* dan dilambangkan dengan notasi *Z*. *Compressibility factor* menunjukkan besarnya penyimpangan yang terjadi pada suatu gas ketika diberi tekanan dan temperatur tertentu. Nilai dari *compressibility factor* dapat diperoleh dari *standard gas compressibility factor chart* pada gambar 2.4. Dengan memperhatikan *compressibility factor* persamaan gas nyata dapat ditulis sebagai berikut :

$$PV = ZnRT \quad \dots(2.18)$$

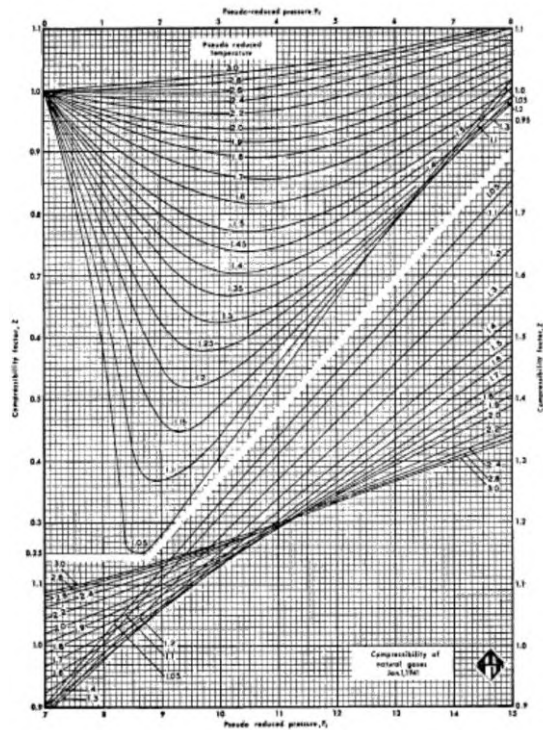
di mana P adalah tekanan. V adalah volume, T adalah temperature absolut, Z adalah *compressibility factor*, n merupakan jumlah mol dari gas, dan R adalah konstanta gas. *Compressibility factor* akan mendekati nilai 1 ketika gas mempunyai tekanan yang rendah dan temperature tinggi. Hal ini berarti pada keadaan tersebut tersebut gas berlaku sebagai gas ideal. Teori yang menghubungkan tingkat keadaan menunjukkan bahwa *compressibility factor* dapat didefinisikan sebagai fungsi dari tekanan yang berkurang dan temperatur yang menurun. Sedangkan *reduced pressure* dan *reduced temperature* didefinisikan sebagai

$$P_r = \frac{P}{P_c} \text{ and } T_r = \frac{T}{T_c} \quad \dots(2.19)$$

di mana P_r dan T_r merupakan *reduced pressure* dan *reduced temperature*. Sedangkan P_c dan T_c adalah tekanan kritis dan temperature kritis. Nilai dari *critical pressure* dan *critical temperature* dapat diestimasi dari persamaan 2.20, jika komposisi dari gas dan *critical properties* dari masing-masing komponen diketahui

$$P_c = \sum_i^N P_{ci} y_i \text{ and } T_c = \sum_i^N T_{ci} y_i \quad \dots(2.20)$$

di mana P_{ci} dan T_{ci} adalah tekanan kritis dan temperature kritis dari komponen i . Sedangkan y_i adalah fraksi mol dari komponen i . Harga dari *critical temperature* dan *critical pressure* dari masing-masing komponen penyusun suatu gas dapat dilihat pada tabel 2.2



Gambar 2.5 Standard gas compressibility factor chart

Tabel 2.2 *Physical constants* untuk komponen penyusun gas alam

Compound	Formula	Molecular weight	Critical constants			
			P_c , psia [kpa]	T_c , °K [°F]	V_c , ft ³ /lb [m ³ /kg]	Z_c
Methane	CH ₄	16.043	667.8[4,604]	343[190.6]	0.0991[0.0062]	0.28884
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	707.8[4,880]	549.8[369.8]	0.0788[0.00492]	0.2843
Propane	C ₃ H ₈	44.097	616.3[4,249]	665.7[369.8]	0.0737[0.0046]	0.2804
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	550.7[3,797]	765.3[425.2]	0.702[0.00438]	0.2756
Isobutane	C ₄ H ₁₀	58.124	529.1[3,648]	734.7[408.2]	0.0724[0.00452]	0.2824
<i>n</i> -Pentane	C ₅ H ₁₂	72.151	488.6[3,369]	845.4[469.7]	0.0675[0.00422]	0.2623
Isopentane	C ₅ H ₁₂	72.151	490.4[3,381]	828.8[460.4]	0.0679[0.00424]	0.2701
Neopentane	C ₅ H ₁₂	72.151	464.0[3,199]	781.1	0.0674[0.00421]	0.2557
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	86.178	436.9[3,012]	913.4[507.4]	0.0688[0.0043]	0.2643
<i>n</i> -Heptane	C ₇ H ₁₆	100.205	396.8[2,736]	972.5[540.3]	0.0691[0.00432]	0.2633
<i>n</i> -Octane	C ₈ H ₁₈	114.232	360.6[2,486]	1,023.0[568.8]	0.0690[0.0043]	0.2587
<i>n</i> -Nonane	C ₉ H ₂₀	128.30	332[2,289]	1,070.3[594.6]	0.0684[0.00427]	0.2536
<i>n</i> -Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.30	304[2,096]	1,111.8[617.7]	0.0679[0.00424]	0.2462
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	729.8[5,032]	508.6[282.6]	0.0737[0.0046]	0.2765
Propene	C ₃ H ₆	42.081	699[4,813]	656[364.9]	0.0689[0.0043]	0.2752
Acetylene	C ₂ H ₂	26.038	890.4[6,139]	555.3[308.5]	0.0695[0.00434]	0.2704
Carbon dioxide	CO ₂	44.010	1071[7,382]	547.6[304.2]	0.0342[0.00214]	0.2742
Hydrogen sulfide	H ₂ S	34.076	1,306[9,005]	672.4[373.6]	0.0459[0.00287]	0.2831
Sulfur dioxide	SO ₂	64.059	1,145[7,894]	775.8[430.8]	0.0306[0.00191]	0.2697
Nitrogen	N ₂	28.013	493[3,399]	227.3[126.3]	0.0514[0.00321]	0.2916
Water	H ₂ O	18.015	3208[22,105]	1,165[647.2]	0.0500[0.00312]	0.2350

Dalam praktik dunia keteknikan, permasalahan permasalahan mengenai fluida sering kali tidak memungkinkan untuk dimodelkan sebagai gas ideal. Sebagai contoh ketika fluida berada pada kondisi tekanan yang sangat tinggi atau berada pada temperatur yang sangat rendah, aliran fluida tidak dapat diasumsikan sebagai gas ideal karena akan memberikan hasil yang tidak akurat. Oleh karena itu, pemodelan real gas harus dipilih sehingga hasil pemodelan bisa mendekati kondisi aktual secara akurat. Software ANSYS FLUENT menyediakan tiga pilihan dalam pemodelan real gas, yaitu :

- *The cubic equation of state models*
Pemodelan ini biasa dipakai untuk menyelesaikan permasalahan untuk gas atau fluida lain yang berada dalam kondisi *supercritical*.
- *The NIST real gas models*
Model ini dapat menyelesaikan permasalahan pada cairan, gas, dan fluida - fluida dalam keadaan *supercritical*. Akan tetapi model ini tidak bisa digunakan untuk pemodelan dua fase.
- *The User-defined gas models*
Pemodelan ini digunakan untuk menyelesaikan permasalahan fluida dalam segala kondisi selama memenuhi persamaan-persamaan yang dituliskan oleh *user*.

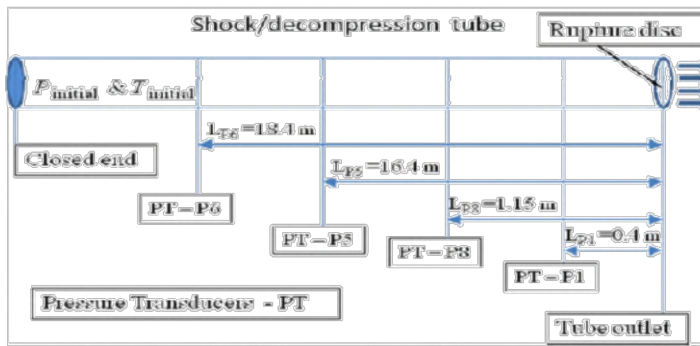
2.9 Penelitian Terdahulu

Studi CFD telah banyak digunakan untuk mengetahui fenomena aliran gas di dalam suatu sistem perpipaan berdasarkan kondisi operasional yang berbeda. Penelitian yang telah dilakukan tersebut telah memberikan kontribusi dalam memahami fenomena aliran gas dalam sistem perpipaan.

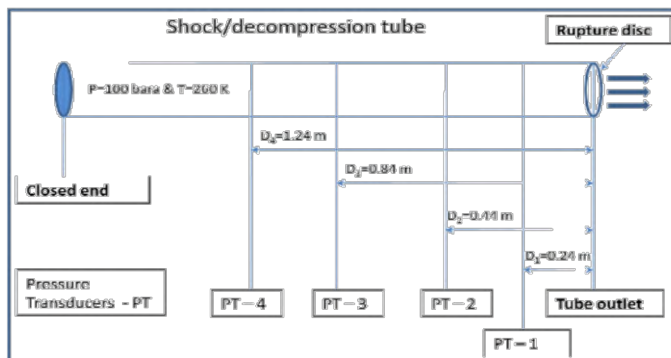
- *Numerical Analysis of Rapid Gas Decompression in Pure Nitrogen using 1D and 3D Transient Mathematical Models of Gas Flow in Pipes*, oleh **Evgenie Burlutskiy (2012)**

Dalam penelitian ini dilakukan investigasi secara numerik mengenai fenomena *decompression* pada aliran gas nitrogen

dalam suatu sistem perpipaan. Simulasi dilakukan untuk menunjukkan perubahan tekanan yang terjadi seiring bertambahnya waktu, Hasil simulasi divalidasi dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh TCPL (*Trans Canada Pipe Lines*) di TCPL *Gas Dynamic Facility*, Didsbury, Alberta, Canada.

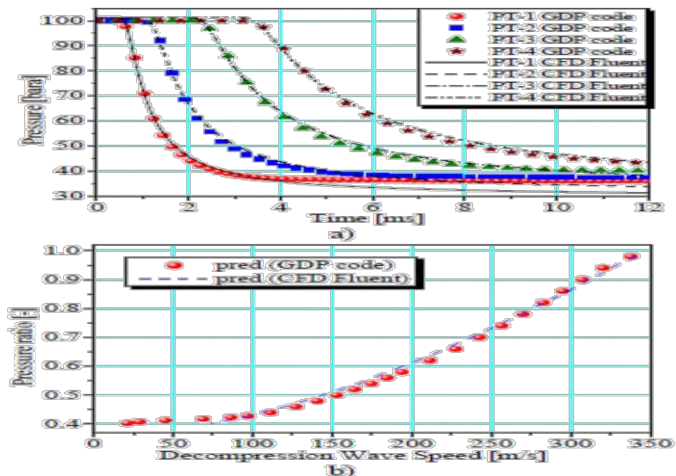


Gambar 2.6 Skema *experimental decompression tube*



Gambar 2.7 Domain *decompression tube* untuk simulasi

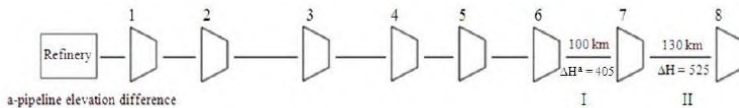
Simulasi dilakukan dengan menggunakan dua software yaitu Gas Decompression Program untuk simulasi 1D dan ANSYS FLUENT untuk simulasi 3D. Pada prinsipnya kedua simulasi dilakukan dengan menyelesaikan persamaan konservasi massa, momentum, dan energi. Properties dari campuran gas dihitung berdasarkan *the Equation of State (EOS) Model*, di mana pemodelan *The Soave-Redlich-Kwong (SRK-EOS)* dipilih. *Time step* yang digunakan untuk memodelkan aliran gas nitrogen secara transien adalah sebesar 10^{-5} detik. Sedangkan untuk menggambarkan turbulensi, digunakan model *Realizable k- ϵ turbulence model*. Berikut adalah grafik perubahan tekanan yang diperoleh dari simulasi dengan menggunakan Gas Decompression Program dan ANSYS FLUENT. Pengambilan data tekanan diambil pada posisi *pressure transducer* yang sesuai dengan letak *PT* sebenarnya.



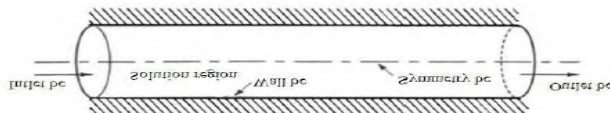
Gambar 2.8 Distribusi tekanan pada posisi masing – masing *pressure transducer* (a) dan kecepatan *decompression wave* sebagai fungsi *pressure ratio*

- *Numerical Simulation of The Transient Flow in Natural Gas Transmission Lines Using A Computational Fluid Dynamic Method*, oleh **Nikan Noorbehest dan Pedram Ghaseminejad (2013)**

Penelitian ini bertujuan untuk menyimulasikan aliran *natural gas* dalam suatu *gas transmission lines* sehingga dapat diamati parameter-parameter yang berpengaruh dalam pendistribusian *natural gas* tersebut. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi jika terjadi kegagalan pada kompresor selama proses pendistribusian. Penelitian ini dilakukan berdasarkan studi kasus di IGAT III atau *the third Iranian Gas Trunkline*. IGAT III merupakan sistem jaringan perpipaan yang biasa mendistribusikan *natural gas* dari selatan sampai utara negara Iran. Dalam penelitian ini dipilih *pipeline* yang terletak di antara *compressor stations* nomor 6, 7, dan 8 untuk dianalisa.



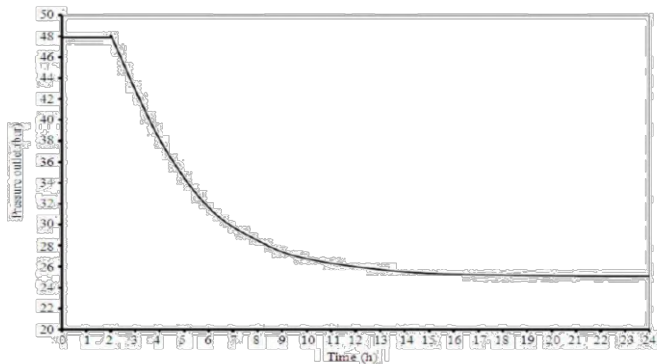
Gambar 2.9 Struktur dari *gas transportation system*



Gambar 2.10 Domain aliran dan *boundary conditions*

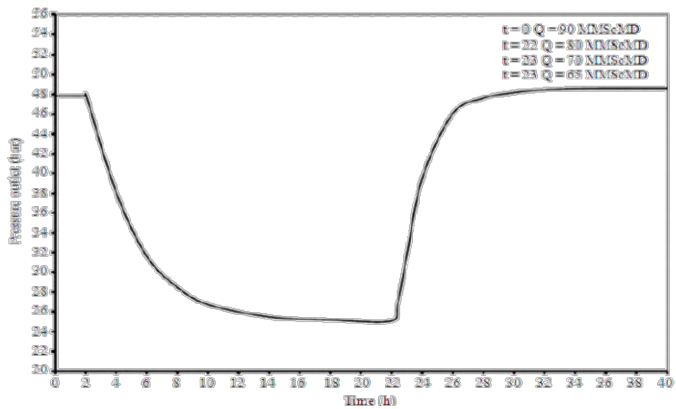
Simulasi dimulai dengan melakukan proses *meshing* terhadap geometri yang telah dibuat. Jumlah mesh dalam simulasi ini adalah sebanyak 873.760 dan 1.103.583 untuk pipeline I dan II. Model turbulensi yang digunakan adalah *standard k-ε*, dengan kriteria konvergensi sebesar $1e-04$. Sedangkan kriteria konvergensi untuk *energy equations* dan persamaan kontinuitas berturut-turut adalah sebesar $1e-08$ dan $1e-05$. Untuk

mendapatkan hasil simulasi yang *time-dependent*, dalam simulasi ini dipilih *time step* sebesar 1200 s. *Solutions Methods* yang digunakan adalah *implicit schemes* dengan menggunakan algoritma SIMPLER. Dari proses simulasi ini diperoleh hasil berupa perubahan tekanan yang terjadi ketika kompresor nomor 7 mengalami kegagalan.



Gambar 2.11 Perubahan tekanan pada *outlet* setelah kegagalan kompresor nomor 7

Dari gambar 2.10 terlihat bahwa nilai tekanan outlet pada *pipeline II* mengalami penurunan yang signifikan setelah kompresor nomor 7 mengalami kegagalan. Padahal agar dapat mencapai *compressor station* di depannya, tekanan outlet tidak boleh kurang dari 47 bar. Salah satu cara agar mendapatkan *pressure outlet* di atas 47 bar adalah dengan mengurangi *gas flow rate*. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan diperoleh bahwa dengan mengubah flow rate dari 90 MMScMD menjadi 65 MMScMd, tekanan keluaran *pipeline* dapat mencapai tekanan di atas 47 bar. Hal tersebut dapat diamati dari grafik pada gambar 2.11.



Gambar 2.12 Perubahan *outlet pressure* ketika *flow rate* berubah seiring waktu

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB III METODOLOGI

3.1 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan penelitian dan simulasi CFD mengenai aliran compressed natural gas dalam pipa selama proses pengisian tube skid di storage plant PLTGU Muara Tawar, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, di antaranya :

1. Studi Kasus

Permasalahan mengenai fenomena *shutdown* tiba-tiba yang dialami kompresor ketika proses pengisian tube skid sedang berlangsung diperoleh berdasarkan observasi kondisi aktual di CNG storage plant PLTGU Muara Tawar, Bekasi, Jawa Barat.

2. Studi Literatur

Untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas, dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan *piping system* untuk CNG dan simulasi numerik untuk aliran *compressed natural gas* di dalam pipa. Studi literatur diperoleh dari *e-book*, jurnal, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik permasalahan.

3. Pengumpulan dan Pengolahan Data Aktual

Sebelum melakukan penelitian, diperlukan adanya data acuan pemodelan dan simulasi dari sistem yang akan ditinjau sehingga dilakukan pengumpulan data aktual sebagai data primer yang kemudian diolah lebih lanjut sehingga diperoleh data sekunder. Kemudian data sekunder digunakan dalam tahapan simulasi.

4. Pemodelan dan Simulasi

Tahapan ini diawali dengan *pre-processing* yaitu pembuatan geometri dan penentuan *domain* dari pipa dengan menggunakan *software* GAMBIT. Selanjutnya, dilakukan *processing* berupa proses simulasi dari domain sistem yang telah dibuat. Dan pada akhir simulasi,

dilakukan *post processing* dengan menampilkan hasil simulasi berupa distribusi tekanan sepanjang pipa selama proses pengisian *tubes skid*. Untuk processing dan post processing menggunakan *software* ANSYS FLUENT.

5. Pengolahan dan Analisa Data Hasil Simulasi

Setelah proses simulasi selesai, dilakukan pengambilan data hasil simulasi. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel sehingga dapat dianalisa secara kuantitatif.

6. Penyusunan Laporan

Keseluruhan tahapan yang telah dilakukan dan hasil dari penelitian yang telah dibahas kemudian disusun dalam bentuk laporan sistematis.

3.2 Flowchart Penelitian

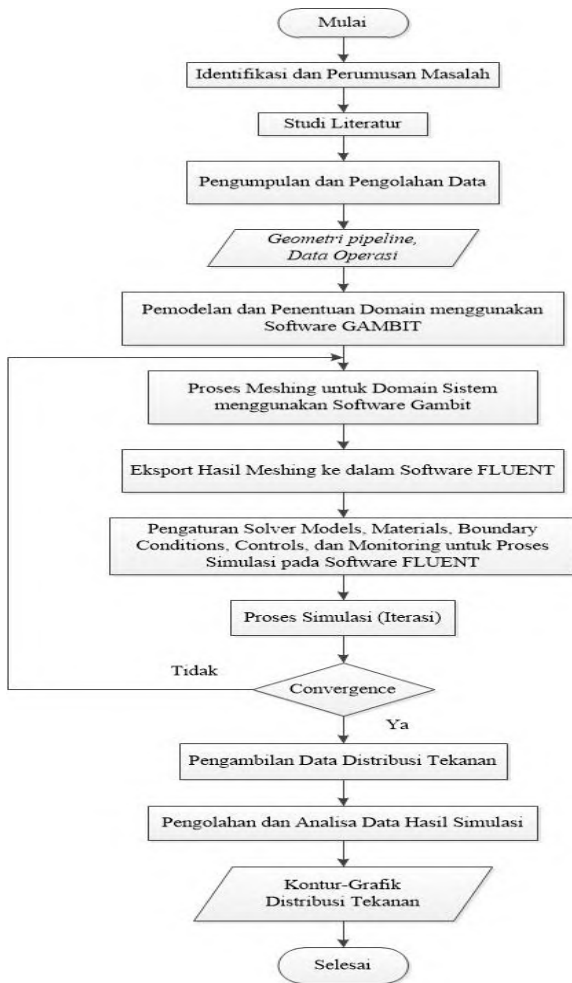
Flowchart dari tahapan penelitian dapat mempermudah proses penelitian dan simulasi yang akan dilakukan. Gambar 3.1 menggambarkan *flowchart* dari tahapan penelitian mengenai simulasi tentang pengaruh posisi dan jarak kompresor terhadap besarnya *pressure drop* yang terjadi selama gas melewati *pipeline*.

3.3 Tahapan Pemodelan dan Simulasi

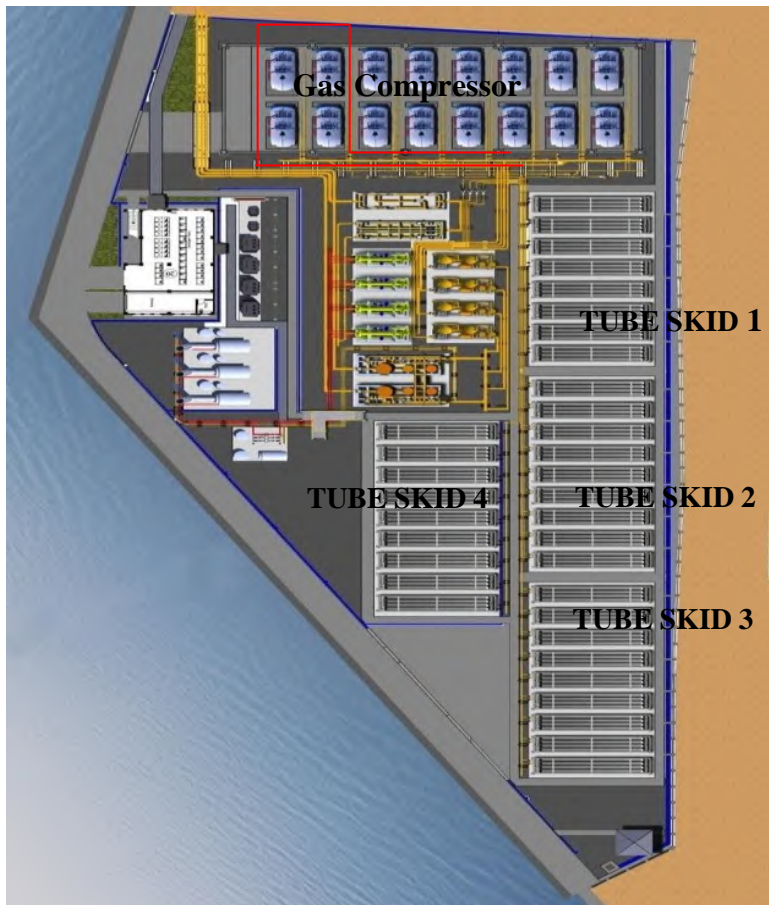
Untuk melakukan pemodelan dan simulasi, terdapat tiga proses berurutan yang perlu dilakukan, yaitu :

3.3.1 Pre-processing

Pre-processing merupakan proses awal simulasi CFD dengan membuat geometri dan menentukan domain sistem menggunakan *software* GAMBIT, berdasarkan desain aktual dari *pipeline* pada CNG Storage Plant PT PJB UP Muara Tawar, yang dapat dilihat pada gambar 3.2. Sedangkan untuk detail dari *pipeline* dapat dilihat pada gambar *isometric* yang dilampirkan di halaman lampiran.

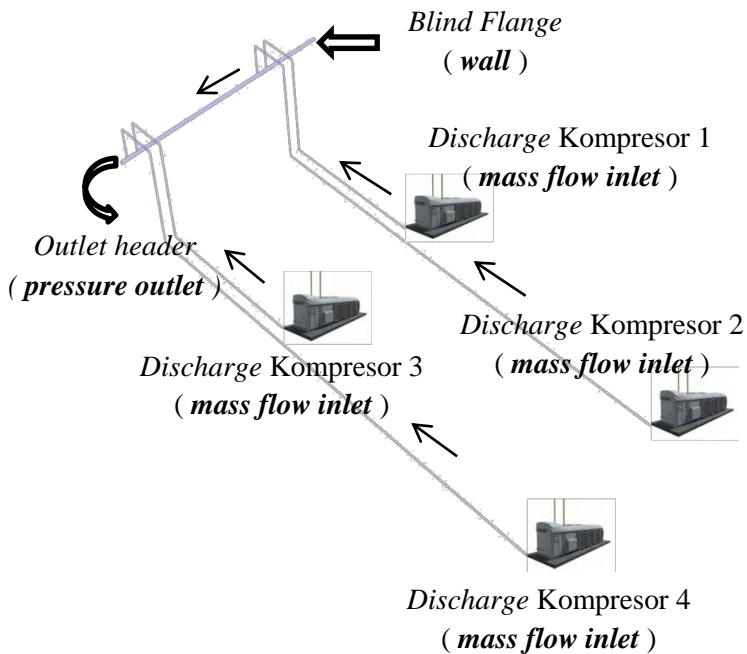


Gambar 3.1 *Flowchart* tahapan penelitian dan simulasi aliran *compressed natural gas* dalam sistem perpipaan di CNG Storage Plant PT. PJB UP Muara Tawar



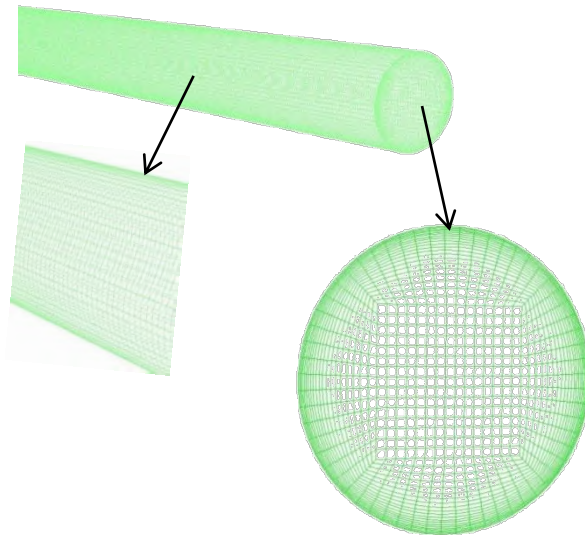
Gambar 3.2 *Layout CNG Storage Plant* PT PJB UP Muara Tawar
(bagian yang berada dalam garis merah merupakan sistem yang akan dimodelkan dalam CFD)

Geometri yang telah dibuat pada *software* GAMBIT 2.4.6 dapat dilihat pada gambar 3.3. Setelah geometri dan *domain* dibuat, dilakukan penentuan *boundary conditions*. Penentuan *boundary conditions* dari domain yang telah dibuat juga dapat dilihat pada gambar 3.3. Untuk *inlet* dari sistem perpipaan *compressed natural gas* ini dipilih *boundary conditions* jenis *mass flow inlet*. Sedangkan pada bagian *outlet* digunakan *boundary conditions* berupa *pressure outlet*. Untuk dinding pipa dipilih *boundary conditions* jenis *wall*.



Gambar 3.3 Domain dan *boundary conditions* pada pipeline

Tahap selanjutnya dari *pre-processing* adalah dilakukan *meshing* pada domain sistem untuk aliran fluida di dalamnya. Proses *meshing* juga dilakukan dengan menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6. Kualitas dan kuantitas mesh yang digunakan akan mempengaruhi proses penyelesaian simulasi. Sehingga dalam pembuatan mesh digunakan *structured mesh* dengan tipe elemen berupa *hexahedron* untuk sebagian besar domain dan *hybrid* untuk bagian *t-junction*. Pada gambar 3.4 di halaman 18, akan ditampilkan hasil *meshing* dari domain yang telah dibuat.



Gambar 3.4 *Meshing* yang telah dilakukan pada domain

3.3.2 *Processing*

Processing merupakan proses kedua dalam simulasi CFD, yakni melakukan simulasi berdasarkan hasil *meshing* dari domain sistem menggunakan *software* FLUENT. Hal yang dilakukan

diantaranya mengatur *solver models*, *materials*, *boundary conditions*, *operating conditions*, *control and monitoring conditions*, serta *initialize conditions*. Setelah dilakukan pengaturan, dapat dimulai proses iterasi untuk menyelesaikan simulasi. Berikut ini merupakan penjelasan lebih lanjut mengenai langkah – langkah dalam *processing*.

1. *Solver Models*

➤ *Viscous*

Turbulence model yang digunakan adalah *realizable k- ϵ* . Hal ini sesuai dengan pemodelan yang telah digunakan oleh **Burlutskiy (2012)**. Model turbulensi ini mampu memberikan performa yang bagus untuk aliran dengan tekanan yang tinggi.

➤ *Energy*

Persamaan energi diaktifkan untuk mendukung penyelesaian heat-transfer maupun efek kompresibilitas aliran terhadap perubahan tekanan dan temperatur.

2. *Materials*

Dalam pengaturan material, material dinding pipa yang digunakan adalah *steel*. Sedangkan untuk fluida yang melewati pipa didefinisikan sebagai *gas methane* karena gas tersebut merupakan komposisi terbanyak dari gas alam. Agar fluida didefinisikan sebagai *ideal gas*, pada pengaturan *properties*, *density drop-down list* diubah menjadi *ideal gas*.

3. *Operating Conditions*

Operating condition digunakan untuk mengatur tekanan operasional di dalam sistem yang disimulasikan. Dalam simulasi ini, tekanan operasional diatur pada kondisi *default*.

4. *Boundary Conditions*

Untuk *inlet* dari pipa didefinisikan sebagai *mass flow inlet* dengan parameter nilai meliputi *mass flow rate*, *pressure*, *flow directions*, dan *temperature*. Sedangkan untuk keluaran pipa *boundary conditions* didefinisikan sebagai *pressure outlet* dengan parameter nilai meliputi *pressure*, *flow directions*, *temperature*, dan *target mass flow*. Untuk dinding pipa sendiri didefinisikan sebagai *wall*, dengan parameter nilai yang dimasukkan adalah *wall roughness*, *temperature*, *material*, dan *wall thickness*. Keseluruhan nilai dari masing – masing *boundary conditions* merupakan hasil pengolahan data aktual.

5. *Control and Monitoring Solutions*

Solutions control yang digunakan untuk metode *pressure velocity-coupling* adalah PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*), dengan diskritisasi *PRESTO!* untuk *pressure*. Sedangkan diskritisasi *second order* digunakan untuk *density*, *momentum*, *turbulent kinetic energy*, *turbulent dissipation rate*, dan *energy*. Penggunaan *solution control* ini didasarkan pada simulasi yang telah dilakukan oleh **Noorbehest dan Ghaseminejad (2013)**. Algoritma dari metode PISO dapat mempercepat konvergensi. Untuk *monitoring solutions* dilakukan pengaturan kriteria residual dengan tingkat konvergensi kurang dari 10^{-5} .

6. *Initialize Conditions*

Initialize merupakan nilai awal untuk tiap parameter sebelum proses iterasi dalam simulasi berjalan. Metode inisialisasi yang digunakan adalah *standart initialize*, untuk mendapatkan nilai parameter awal berdasarkan *boundary conditions mass flow inlet*.

7. *Iterations*

Setelah keseluruhan pengaturan dilakukan, proses simulasi dimulai dengan melakukan itersai hingga memenuhi kriteria konvergensi. Kriteria konvergensi ditentukan berdasarkan *residual monitoring level* yang telah diatur sebelumnya.

Dalam simulasi yang dilakukan untuk penelitian tugas akhir ini dipilih variasi tekanan pada *outlet header*. Hal ini dikarenakan tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh nilai tekanan yang dihasilkan oleh masing – masing kompresor ketika tekanan pada *outlet header* mencapai nilai tertentu. Variasi tekanan pada *outlet header* yang dilakukan adalah 5 barg, 15 barg, 200 barg, 220 barg, 240 barg, dan 250 barg. Pemilihan nilai – nilai tersebut didasarkan pada kondisi awal dan kondisi kritis dari sistem perpipaan tersebut. Pada kondisi awal, yaitu ketika kondisi *tube skid* masih kosong, tekanan di dalam skid berkisar antara 10 – 15 barg. Sedangkan yang dimaksud dengan kondisi kritis ini adalah ketika kompresor mulai mengalami *shut down* secara tiba-tiba. Pada saat tersebut, tekanan gas di dalam tube skid belum mencapai tekanan yang diinginkan, yaitu 250 barg, namun kompresor yang jaraknya terjauh dari tube skid mengalami kegagalan dan *shut down*. Padahal kompresor telah diatur agar dapat mengompresi *natural gas* sampai tekanan 260 barg. Dengan memvariasikan tekanan pada kondisi tekanan 200 barg, 220 barg, 240 barg, dan 250 barg, diharapkan nantinya dapat diperoleh pola kenaikan tekanan yang dihasilkan oleh masing – masing kompresor.

3.3.3 *Post-processing*

Dari hasil simulasi diperoleh data kualitatif maupun kuantitatif mengenai fenomena yang terjadi pada aliran *compressed natural gas* di sistem perpipaan. Akan tetapi sebelum dilakukan pengambilan data, baik itu secara kualitatif maupun kuantitatif, terlebih dahulu dilakukan *grid independency test*. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh jumlah grid yang dihasilkan setelah proses meshing terhadap hasil simulasi yang

dihasilkan. Berikut adalah hasil dari *grid independency test* yang telah dilakukan.

Tabel 3.1 Hasil *grid independency test*

Jumlah Grid	Tekanan Discharge (mbarg)			
	Kompresor 1	Kompresor 2	Kompresor 3	Kompresor 4
330,999	5200.3	5489.1	5047.9	5204.5
889,602	6077.7	6484.3	5931.3	6252.9
993,523	6080.13	6439.9	5930.2	6252.6

Dengan memperhatikan hasil dari *grid independency test* di atas, maka jumlah grid yang dipakai dalam penelitian ini adalah 889,602. Setelah tahapan *grid independency test* dilakukan, selanjutnya adalah proses pengambilan data secara kualitatif dan kuantitatif. Dari data kualitatif, dapat diamati visualisasi aliran *compressed natural gas* di sepanjang *pipeline* yang terjadi selama proses pengisian *tube skid*, sedangkan dari data kuantitatif dapat diketahui besarnya perubahan tekanan, temperature, dan kecepatan pada *outlet compressor* dan *inlet tube skid* selama proses pengisian sedang berlangsung. Berdasarkan data kuantitatif yang diperoleh, nantinya dibuat grafik perubahan tekanan, dan kecepatan pada *oulet* kompresor dan *inlet tube skid*.

BAB IV HASIL DAN ANALISA DATA

4.1 Validasi Hasil Simulasi

Pengambilan data hasil simulasi untuk semua variasi dilakukan pada iterasi antara 5000 – 6000 dengan terpenuhinya kriteria konvergensi 10^{-5} untuk parameter *continuity*, *x-velocity*, *y-velocity*, *z-velocity*, dan turbulensi. *Mass flux report* dalam proses simulasi ini berkisar di bawah 0.5%. Proses validasi yang pertama dilakukan dengan *grid independency test*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh jumlah grid terhadap hasil simulasi yang dihasilkan. Hasil *grid independency test* yang telah dilakukan untuk variasi tekanan *outlet header* sebesar 5 barg dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.1 Hasil *grid independency test*

Jumlah Grid	Tekanan Discharge (mbarg)			
	Kompresor 1	Kompresor 2	Kompresor 3	Kompresor 4
330,999	5200.3	5489.1	5047.9	5204.5
889,602	6077.7	6484.3	5931.3	6252.9
993,523	6080.13	6439.9	5930.2	6252.6

Berdasarkan data pada tabel 4.1, Terlihat bahwa terdapat perubahan nilai yang signifikan pada hasil simulasi ketika menggunakan jumlah grid 330,999 dibandingkan dengan jumlah grid 889,602. Sedangkan antara jumlah grid 889,602 dengan jumlah grid 993,523 , nilai tekanan *discharge* yang dihasilkan oleh masing - masing kompresor tidak jauh berbeda. Oleh karena itu dalam proses simulasi ini akan dilakukan dengan menggunakan jumlah grid sebanyak 889,602.

Selanjutnya, untuk mengetahui keakuratan proses simulasi, dilakukan validasi perbandingan data simulasi dengan perhitungan teoritis berdasarkan *General Flow Equation* yang telah dimodifikasi dengan memperhatikan faktor elevasi dari *pipeline*. Jadi dalam persamaan tersebut, ketinggian pipa juga mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap besarnya *pressure drop* yang terjadi pada aliran. Jika proses validasi dilakukan

dengan menggunakan persamaan API Recommended Practice 14E section 4.2, hasil perhitungan yang dilakukan tidak relevan dengan kondisi domain, dimana terdapat pipa dengan arah vertikal pada domain tersebut. Sedangkan persamaan API Recommended Practice 14E section 4.2 hanya digunakan untuk menghitung *pressure drop* pada pipa horizontal saja. Dengan membandingkan data hasil simulasi dengan perhitungan teoritis, maka akan dapat diketahui seberapa besar *error* yang terjadi untuk masing masing variasi. Secara umum, rata-rata *error* yang terjadi adalah sebesar 4.55 %. Dilihat dari besar *error* yang terjadi maka hasil simulasi dapat diterima atau dinyatakan valid, karena batas *error* yang diperbolehkan dalam CFD adalah 10%. Hasil validasi dari proses simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat pada table 4.2 berikut.

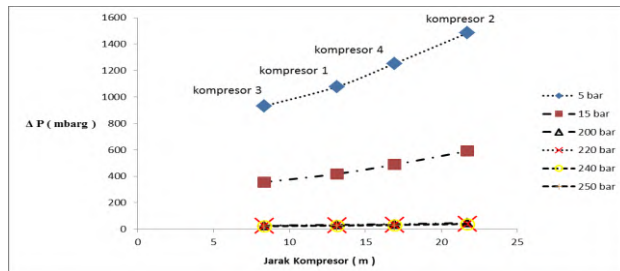
Tabel 4.2 Validasi hasil simulasi

Tekanan Outlet Header (barg)	Pipa Kompresor 1			Pipa Kompresor 2			Pipa Kompresor 3			Pipa Kompresor 4		
	AP Simulasi (inhari)	AP Teoritis (inhari)	% Error	AP Simulasi (inhari)	AP Teoritis (inhari)	% Error	AP Simulasi (inhari)	AP Teoritis (inhari)	% Error	AP Simulasi (inhari)	AP Teoritis (inhari)	% Error
5	1077.7	1022.15	5.15	1484.5	1354.30	8.75	931.5	880.35	5.54	1252.0	1219.04	2.74
15	418.48	396.57	5.28	591.04	613.98	3.88	355.45	325.25	8.69	488.12	501.51	2.65
200	52.98	35.87	8.77	46.94	50.22	6.89	28	29.58	5.35	39	41.35	6.01
220	38	31.93	6.59	42.94	41.94	2.35	23.88	23.82	0.03	35	34.16	2.44
240	27.68	28.25	1.98	39.08	40.99	4.95	23.07	23.17	0.16	32	33.58	4.53
250	26.65	27.18	1.99	37.84	40.82	7.88	22.74	22.27	2.15	31	30.14	2.78
Rata - Rata % Error	4.83			5.79			4.61			2.97		

4.2 Posisi Pengamatan Hasil Simulasi

Dalam sub bab selanjutnya akan dijelaskan mengenai perubahan tekanan yang terjadi pada aliran CNG dari *discharge* kompresor menuju ke *outlet header*. Untuk itu analisa dilakukan pada masing – masing variasi tekanan *outlet header*, yaitu 5 barg, 15 barg, 200 barg, 220 barg, 240 barg, dan 250 barg. Pengambilan data dilakukan pada 4 posisi *discharge* kompresor, mulai dari kompresor yang paling dekat dengan *outlet header* sampai dengan kompresor terjauh dari *outlet header*. Kompresor 2 merupakan kompresor dengan jarak terjauh yaitu 21.73 meter dari *outlet header*. Kemudian diikuti dengan kompresor 4 dengan jarak 16.93 meter, kompresor 1 dengan jarak 13.14 meter. Sedangkan kompresor 3 dengan jarak 8.34 meter merupakan kompresor terdekat dari *outlet header*.

4.3 Analisa *Pressure Drop* Aliran



Gambar 4.1 Grafik *pressure drop* aliran gas fungsi jarak kompresor dengan variasi tekanan *outlet header*

Grafik di atas menampilkan data mengenai besarnya *pressure drop* yang terjadi pada aliran berdasarkan posisi dari masing – masing kompresor. Dapat diamati bahwa semakin jauh jarak kompresor dari *outlet header*, semakin besar *pressure drop* yang terjadi. Selain itu dapat diamati pula bahwa peningkatan *pressure* yang dihasilkan oleh kompresor berbanding terbalik dengan besar *pressure drop* yang terjadi. Sehingga semakin besar tekanan yang dihasilkan oleh kompresor, *pressure drop* yang dialami aliran CNG melewati *pipeline* akan semakin mengecil.

Untuk variasi tekanan *outlet header* sebesar 5 barg, besar *pressure drop* pada aliran CNG yang dikompresi oleh kompresor 2 adalah sebesar 1484.265 mbarg. Kompresor nomor 2 merupakan kompresor terjauh dari *outlet header*, dengan jarak 21.733 m. Nilai *pressure drop* yang dialami oleh aliran hasil kompresi kompresor nomor 2 tersebut merupakan nilai *pressure drop* terbesar jika dibandingkan dengan aliran yang dikompresi oleh kompresor lain. Selanjutnya, *pressure drop* sebesar 1252.87 mbarg dialami oleh aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 4 yang terletak sejauh 166.931 m dari *outlet header*. Sedangkan untuk aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 1 mengalami *pressure drop* sebesar 1077.727 mbarg. Kompresor nomor 1 terletak sejauh 13.141 m dari *outlet header*. *Pressure drop* terkecil terjadi pada aliran yang dikompresi oleh kompresor

nomor 3. Kompresor 3 merupakan kompresor terdekat dengan *outlet header*. *Pressure drop* yang terjadi adalah sebesar 931.298 mbarg.

Ketika variasi tekanan *outlet header* sebesar 15 barg, besar *pressure drop* pada aliran CNG yang dikompresi oleh kompresor nomor 2, yang merupakan kompresor terjauh dari *outlet header*, adalah sebesar 591.035 mbarg. Nilai *pressure drop* yang dialami oleh aliran hasil kompresi kompresor nomor 2 tersebut merupakan nilai *pressure drop* terbesar jika dibandingkan dengan aliran yang dikompresi oleh kompresor lain. Selanjutnya, aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 4 yang terletak sejauh 166.931 m dari *outlet header* mengalami *pressure drop* sebesar 488.721 mbarg. Sedangkan untuk aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 1 mengalami *pressure drop* sebesar 418.476 mbarg. Kompresor nomor 1 terletak sejauh 13.141 m dari *outlet header*. *Pressure drop* terkecil adalah sebesar 355.424 mbarg dan terjadi pada aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 3. Kompresor 3 merupakan kompresor terdekat dengan *outlet header*.

Untuk pembahasan selanjutnya kita tinjau grafik yang terbentuk pada kondisi puncak, dimana tekanan pada *outlet header* adalah 250 barg. Pada kondisi tersebut, besar *pressure drop* pada aliran CNG yang dikompresi oleh kompresor 2 adalah sebesar 37.838 mbarg. Kompresor nomor 2 merupakan kompresor terjauh dari *outlet header*, dengan jarak 21.733 m. Nilai *pressure drop* yang dialami oleh aliran hasil kompresi kompresor nomor 2 tersebut merupakan nilai *pressure drop* terbesar jika dibandingkan dengan aliran yang dikompresi oleh kompresor lain pada kondisi *outlet header* yang sama. Selanjutnya, *pressure drop* sebesar 31 mbarg dialami oleh aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 4 yang terletak sejauh 166.931 m dari *outlet header*. Sedangkan untuk aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 1 mengalami *pressure drop* sebesar 26.6 mbarg. Kompresor nomor 1 terletak sejauh 13.141 m dari *outlet header*. *Pressure drop* terkecil terjadi pada aliran

yang dikompresi oleh kompresor nomor 3. Kompresor 3 merupakan kompresor terdekat dengan *outlet header*. *Pressure drop* yang terjadi adalah sebesar 22.76 mbarg.

Berdasarkan pembahasan tentang grafik pada gambar 4.1 di atas, dengan membandingkan ketiga kondisi tekanan outlet header 5 barg, 15 barg, dan 250 barg, terlihat bahwa *pressure drop* mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya tekanan yang terjadi pada kompresor. Jika ditinjau dengan persamaan Bernoulli pada persamaan 2.1, dengan asumsi bahwa elevasi pipa adalah sama, maka persamaan 2.1 menjadi $P_1 - P_2 = \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2)$. Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa tekanan fluida berbanding terbalik terhadap kuadrat kecepatannya. Semakin besar tekanan, maka kecepatan aliran justru akan semakin menurun. Sedangkan berdasarkan persamaan *pressure drop* $\Delta P = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu V}{D}$, *pressure drop* yang terjadi pada aliran sebanding dengan kenaikan kecepatan aliran. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, semakin cepat aliran, tekanannya semakin mengecil. Begitu pula sebaliknya, semakin lambat kecepatan aliran tekanannya akan meningkat. Dari hubungan ini, dapat ditarik kesimpulan bahwa besar *pressure drop* yang terjadi pada aliran akan semakin mengecil seiring dengan meningkatnya tekanan yang dihasilkan oleh kompresor. Pada gambar 4.1 di atas, besar *pressure drop* yang terjadi pada masing – masing kompresor membentuk grafik parabola. Hal tersebut dikarenakan perubahan tekanan merupakan fungsi kuadrat dari kecepatan, sehingga grafik yang terbentuk merupakan grafik parabola.

4.4 Analisa Tekanan yang Dihasilkan oleh Masing-masing Kompresor

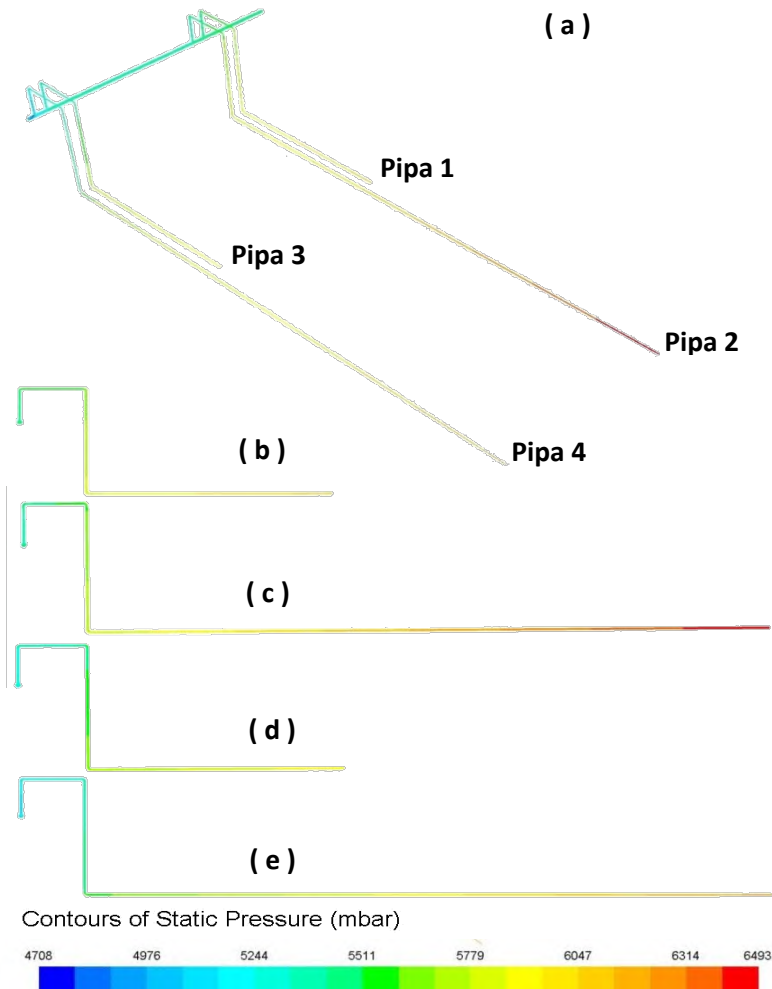
4.4.1 Variasi Tekanan *Outlet Header* 5 barg

Pengamatan tekanan aliran *CNG* dilakukan untuk mengetahui perubahan tekanan yang terjadi selama aliran melewati pipeline, mulai dari discharge kompresor sampai dengan outlet header. Fenomena perubahan tekanan aliran *cng*

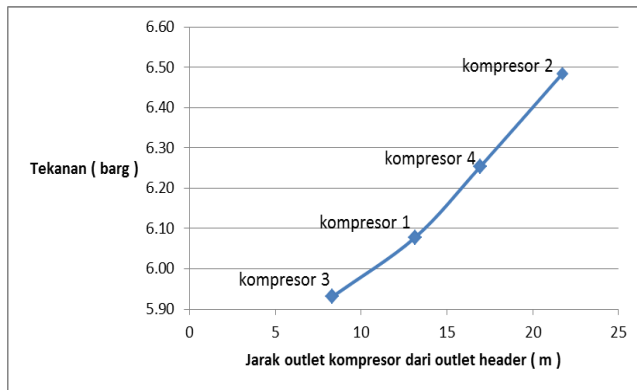
selama melewati pipeline dapat diamati pada gambar 4.2. Secara kualitatif dapat diamati bahwa tekanan tertinggi dihasilkan oleh kompresor nomor 2, yaitu mencapai 6.31 – 6.49 barg yang ditunjukkan oleh kontur oranye sampai kemerahan. Dari gambar 4.2 juga dapat diamati bahwa kontur untuk semua pipa setelah *discharge* kompresor sampai pipa *header* terjadi gradasi warna, hal ini menunjukkan adanya perubahan tekanan sepanjang pipa tersebut. Pada pipa nomor 2, atau setelah *discharge* kompresor 2 paling banyak mengalami perubahan kontur warna, yaitu mulai warna merah saat di posisi *discharge* kompresor kemudian berubah menjadi kuning sampai kemudian menjadi warna hijau muda ketika mulai masuk pipa *header*. Hal ini menunjukkan bahwa pada pipa nomor 2 tersebut paling besar mengalami *pressure drop*.

Selanjutnya pada pipa *header* dapat dilihat bahwa kontur warna sepanjang *header* relatif sama, yaitu biru kehijauan. Hal ini menunjuk bahwa tekanan pada pipa *header* adalah sama, baik itu dekat ataupun jauh dari *outlet header*.

Untuk mengetahui perbedaan tekanan secara kuantitatif antara kompresor 1, 2, 3, dan 4 ketika tekanan inlet tube skid bernilai 5 bar dapat dilihat pada gambar 4.3 . Pada grafik tersebut dapat dilihat besarnya tekanan pada setiap kompresor , fungsi posisi atau jarak kompresor terhadap *outlet* dari *header*. Dari grafik pada gambar 4.3 terlihat bahwa semakin jauh posisi kompresor dari *outlet header*, semakin besar tekanan yang dihasilkan oleh kompresor. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.2 , bahwa jarak masing – masing kompresor dari yang terjauh secara berturut adalah kompresor 2, 4, 1, dan 3. Jarak kompresor 2 dari *outle header* adalah 21.73 meter. Sedangkan kompresor 4 berjarak 16.93 meter, kompresor 1 berjarak 13.14 meter dan kompresor 3 berjarak 8.34 meter dari *outlet header*.



Gambar 4.2 Kontur tekanan aliran *compressed natural gas* sepanjang *pipeline* **a)** Pandangan *isometric* **b)** Pandangan sampling pipa 1 **c)** Pandangan sampling pipa 2 **d)** Pandangan sampling pipa 3 **e)** Pandangan sampling pipa 4 .



Gambar 4.3 Grafik tekanan *discharge* kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan *outlet header* bernilai 5 barg

Dengan demikian, kompresor 2 menghasilkan tekanan paling besar jika dibandingkan dengan kompresor lainnya dikarenakan posisi dari kompresor 2 adalah terjauh dari *outlet header*. Tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 2 adalah sebesar 6.48 barg. Selanjutnya tekanan kompresor terbesar setelah kompresor nomor 2 adalah kompresor 4, yang berjarak 16.93 meter dari outlet header. Tekanan yang dihasilkan dari kompresor 4 adalah sebesar 6.25 barg. Sedangkan tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 1 adalah sebesar 6.08 barg. Kompresor 3, yang notabene merupakan kompresor paling dekat dengan *outlet header*, menghasilkan tekanan 5.93 barg. Tekanan tersebut merupakan tekanan terkecil dibanding tekanan yang dihasilkan oleh kompresor lainnya.

Dengan memperhatikan grafik pada gambar 4.3, besar tekanan yang terjadi pada masing – masing kompresor dapat diketahui. Dengan demikian, besarnya *pressure drop* yang terjadi selama aliran melewati *pipeline* juga dapat dihitung. Untuk lebih jelasnya, besar *pressure drop* yang terjadi dapat dilihat pada tabel 4.3 berikut.

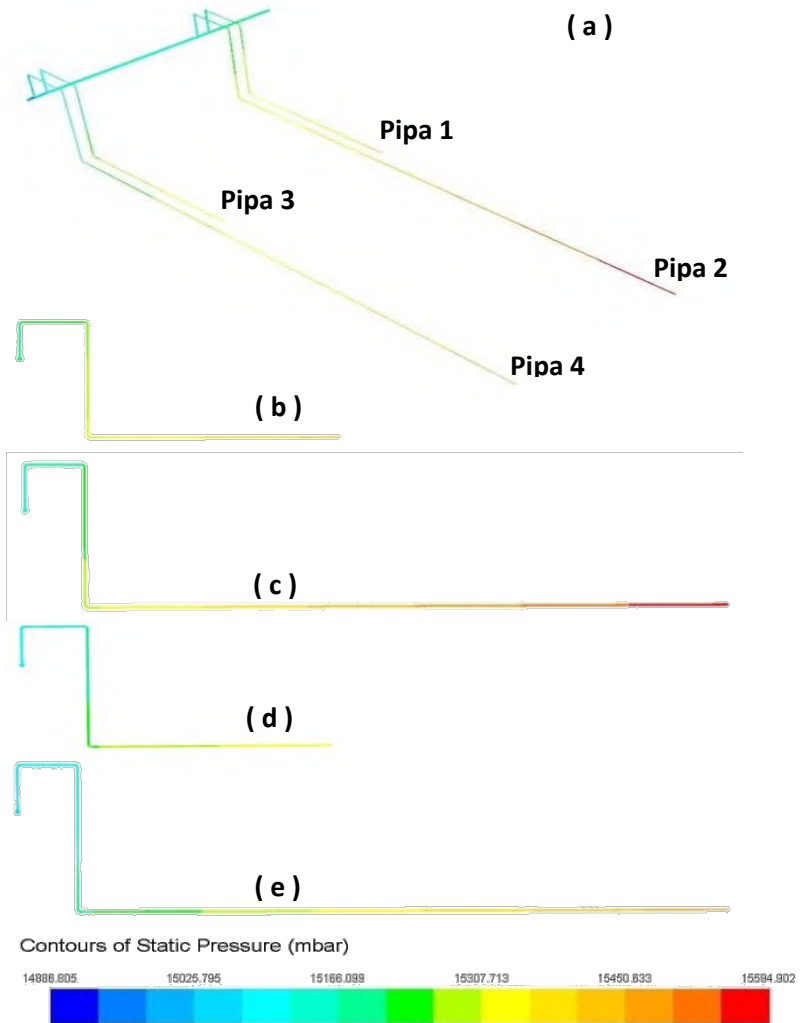
Tabel 4.3 Perbandingan besar *pressure drop* yang terjadi pada masing – masing *discharge* kompresor

	Kompresor 1	Kompresor 2	Kompresor 3	Kompresor 4
Jarak dari inlet tube skid (m)	13.14	21.73	8.34	16.93
Tekanan yang dihasilkan (barg)	6.08	6.48	5.93	62.52
Besar Pressure Drop (mbarg / m)	82.017	68.31	111.67	74.01

4.4.2 Variasi Tekanan Inlet Tube Skid 15 barg

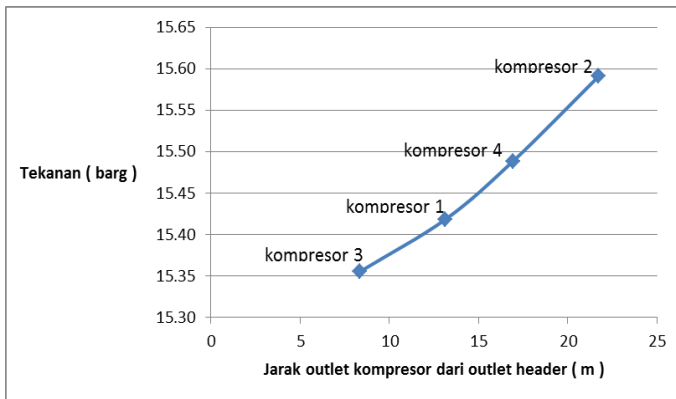
Perubahan tekanan yang terjadi pada aliran *CNG* melewati pipeline selanjutnya diamati untuk variasi tekanan *outlet header* 15 barg. Dengan diketahuinya tekanan pada *outlet header* sebesar 15 barg, maka besar tekanan yang dihasilkan masing – masing kompresor akan dapat diketahui dengan proses simulasi menggunakan *software*. Hasil simulasi yang berupa data kualitatif dapat diamati pada gambar 4.4 . Data kualitatif pada gambar 4.4 menunjukkan fenomena perubahan tekanan aliran *CNG* selama melewati pipeline. Secara kualitatif dapat diamati bahwa tekanan tertinggi dihasilkan oleh kompresor nomor 2, yaitu mencapai 15.45 – 15.59 barg yang ditunjukkan oleh kontur oranye sampai kemerahan. Dari gambar 4.3 juga dapat diamati bahwa kontur untuk semua pipa setelah *discharge* kompresor sampai pipa *header* terjadi gradasi warna, hal ini menunjukkan adanya perubahan tekanan sepanjang pipa tersebut. Pada pipa nomor 2, atau setelah *discharge* kompresor 2 paling banyak mengalami perubahan kontur warna, yaitu mulai warna merah saat di posisi *discharge* kompresor kemudian berubah menjadi kuning sampai kemudian menjadi warna hijau muda ketika mulai masuk pipa *header*. Hal ini menunjukkan bahwa pada pipa nomor 2 tersebut paling besar mengalami *pressure drop*.

Selanjutnya pada pipa *header* dapat dilihat bahwa kontur warna sepanjang *header* relatif sama, yaitu biru kehijauan. Hal ini menunjuk bahwa tekanan pada pipa *header* adalah sama, baik itu dekat ataupun jauh dari *outlet header*.



Gambar 4.4 Kontur tekanan aliran *compressed natural gas* sepanjang *pipeline a)* Pandangan *isometric b)* Pandangan samping pipa 1 *c)* Pandangan samping pipa 2 *d)* Pandangan samping pipa 3 *e)* Pandangan samping pipa 4 .

Untuk mengetahui perbedaan tekanan secara kuantitatif antara kompresor 1, 2, 3, dan 4 ketika tekanan *outlet header* bernilai 15 barg dapat dilihat pada gambar 4.5. Pada grafik tersebut dapat dilihat besarnya tekanan pada setiap kompresor fungsi posisi atau jarak kompresor terhadap *outlet* dari header. Dari grafik pada gambar 4.5 terlihat bahwa semakin jauh posisi kompresor dari *outlet header*, semakin besar tekanan yang dihasilkan oleh kompresor. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.2, bahwa jarak masing – masing kompresor dari yang terjauh secara berturut – turut adalah kompresor 2, 4, 1, dan 3. Jarak kompresor 2 dari outlet header adalah 21.73 meter. Sedangkan kompresor 4 berjarak 16.93 meter, kompresor 1 berjarak 13.14 meter dan kompresor 3 berjarak 8.34 meter dari outlet header



Gambar 4.5 Grafik tekanan *discharge* kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan *outlet header* bernilai 15 barg

Dengan demikian, kompresor 2 menghasilkan tekanan paling besar jika dibandingkan dengan kompresor lainnya dikarenakan posisi dari kompresor 2 adalah terjauh dari *outlet header*. Tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 2 adalah sebesar 15.59 barg. Selanjutnya tekanan kompresor terbesar setelah kompresor nomor 2 adalah kompresor 4, yang berjarak

16.93 meter dari *outlet header*. Tekanan yang dihasilkan dari kompresor 4 adalah sebesar 15.49 barg. Sedangkan tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 1 adalah sebesar 15.42 barg. Kompresor 3, yang notabene merupakan kompresor paling dekat dengan *outlet header*, menghasilkan tekanan 15.35 barg. Tekanan tersebut merupakan tekanan terkecil dibanding tekanan yang dihasilkan oleh kompresor lainnya.

Dengan memperhatikan grafik pada gambar 4.5, besar tekanan yang terjadi pada masing – masing kompresor dapat diketahui. Dengan demikian, besarnya *pressure drop* yang terjadi selama aliran melewati *pipeline* juga dapat dihitung. Untuk lebih jelasnya, besar *pressure drop* yang terjadi dapat dilihat pada tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Perbandingan besar *pressure drop* yang terjadi pada masing – masing *discharge* kompresor

	Kompresor 1	Kompresor 2	Kompresor 3	Kompresor 4
Jarak dari inlet tube skid (m)	13.14	21.73	8.34	16.93
Tekanan yang dihasilkan (barg)	15.42	15.59	15.36	15.49
Besar <i>pressure drop</i> (mbarg / m)	31.85	27.19	42.62	28.87

4.4.3 Variasi Tekanan Outlet Header 200 barg

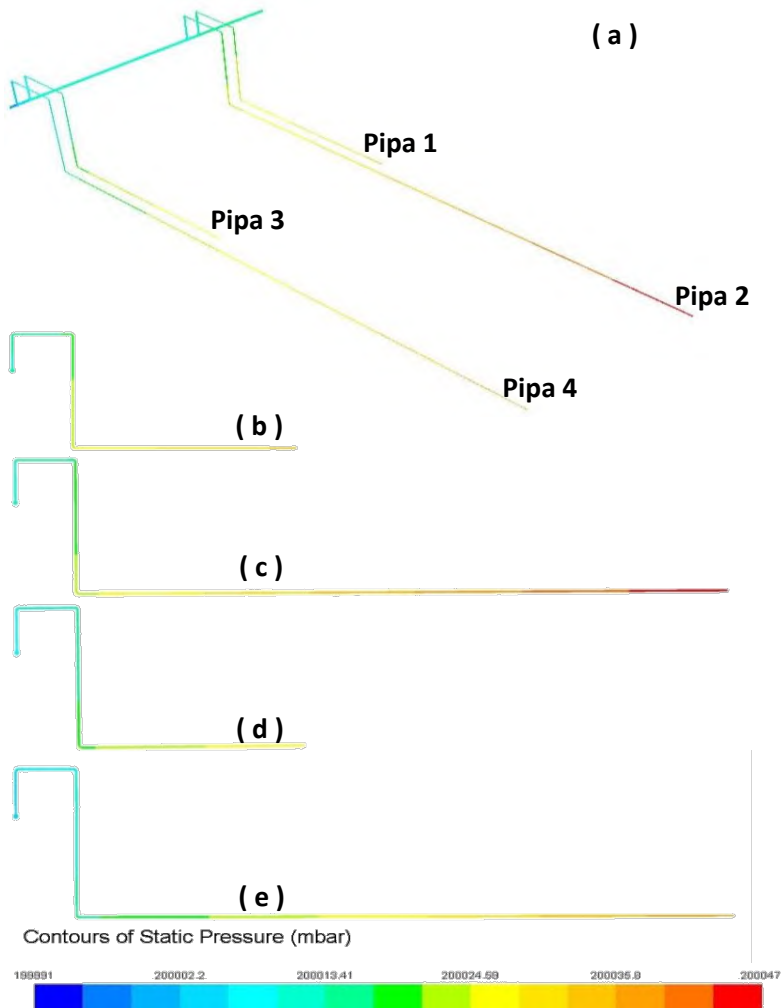
Pengamatan perubahan tekanan pada aliran CNG selanjutnya adalah untuk variasi tekanan *outlet header* 200 barg. Fenomena perubahan tekanan aliran CNG selama melewati *pipeline* dapat diamati pada gambar 4.6 dengan memperhatikan perubahan kontur warna pada domain. Secara kualitatif dapat diamati bahwa tekanan tertinggi dihasilkan oleh kompresor nomor 2, yaitu mencapai 200.03 – 200.05 barg yang ditunjukkan oleh kontur oranye sampai kemerahan. Dari gambar 4.6 juga dapat diamati bahwa kontur untuk semua pipa setelah *discharge* kompresor sampai pipa *header* terjadi gradasi warna, hal ini menunjukkan adanya perubahan tekanan sepanjang pipa tersebut. Pada pipa nomor 2, atau setelah *discharge* kompresor 2 paling banyak mengalami perubahan kontur warna, yaitu mulai warna merah saat di posisi *discharge* kompresor kemudian berubah

menjadi kuning sampai kemudian menjadi warna hijau muda ketika mulai masuk pipa header. Hal ini menunjukkan bahwa pada pipa nomor 2 tersebut paling besar mengalami pressure drop.

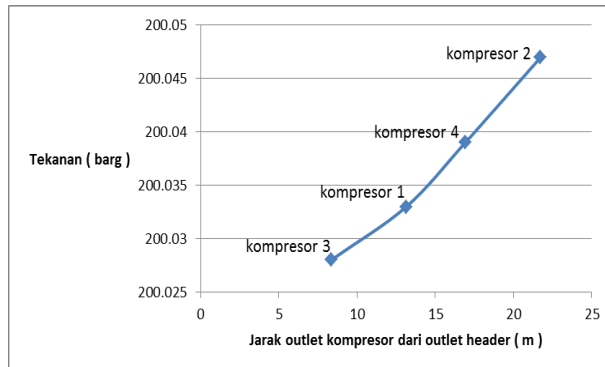
Selanjutnya pada pipa header dapat dilihat bahwa kontur warna sepanjang header relatif sama, yaitu biru kehijauan. Hal ini menunjuk bahwa tekanan pada pipa header adalah sama, baik itu dekat ataupun jauh dari outlet header.

Untuk mengetahui perbedaan tekanan secara kuantitatif antara kompresor 1, 2, 3, dan 4 ketika tekanan *outlet header* bernilai 200 barg dapat dilihat pada grafik di gambar 4.7 . Pada grafik tersebut dapat dilihat besarnya tekanan pada setiap kompresor , fungsi posisi atau jarak kompresor terhadap outlet dari header. Dari grafik pada gambar 4.7 terlihat bahwa semakin jauh posisi kompresor dari outlet header, semakin besar tekanan yang dihasilkan oleh kompresor. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.2 , bahwa jarak masing – masing kompresor dari yang terjauh secara berturut - turut adalah kompresor 2, 4, 1, dan 3. Jarak kompresor 2 dari outlet header adalah 21.73 meter. Sedangkan kompresor 4 berjarak 16.93 meter, kompresor 1 berjarak 13.14 meter dan kompresor 3 berjarak 8.34 meter dari outlet header.

Dengan demikian, kompresor 2 menghasilkan tekanan paling besar jika dibandingkan dengan kompresor lainnya dikarenakan posisi dari kompresor 2 adalah terjauh dari outlet header. Tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 2 adalah sebesar 200.05 barg. Selanjutnya tekanan kompresor terbesar setelah kompresor nomor 2 adalah kompresor 4 , yang berjarak 16.93 meter dari outlet header. Tekanan yang dihasilkan dari kompresor 4 adalah sebesar 200.04 barg. Sedangkan tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 1 adalah sebesar 200.032 barg. Kompresor 3, yang merupakan kompresor paling dekat dengan outlet header, menghasilkan tekanan 200.028 barg. Tekanan tersebut merupakan tekanan terkecil dibanding tekanan yang dihasilkan oleh kompresor lainnya



Gambar 4.6 Kontur tekanan aliran *compressed natural gas* sepanjang *pipeline* **a)** Pandangan *isometric* **b)** Pandangan samping pipa 1 **c)** Pandangan samping pipa 2 **d)** Pandangan samping pipa 3 **e)** Pandangan samping pipa 4



Gambar 4.7 Grafik tekanan *discharge* kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan *outlet header* bernilai 200 barg

Dengan memperhatikan grafik pada gambar 4.7, besar tekanan yang terjadi pada masing – masing kompresor dapat diketahui. Dengan demikian, besarnya *pressure drop* yang terjadi selama aliran melewati *pipeline* juga dapat dihitung. Untuk lebih jelasnya, besar *pressure drop* yang terjadi dapat dilihat pada tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5 Perbandingan besar *pressure drop* yang terjadi pada masing – masing *discharge* kompresor

	Kompresor 1	Kompresor 2	Kompresor 3	Kompresor 4
Jarak dari inlet tube skid (m)	13.14	21.73	8.34	16.93
Tekanan yang dihasilkan (barg)	200.033	200.047	200.028	200.039
Besar Pressure Drop (mbarg / m)	2.51	2.16	3.36	2.30

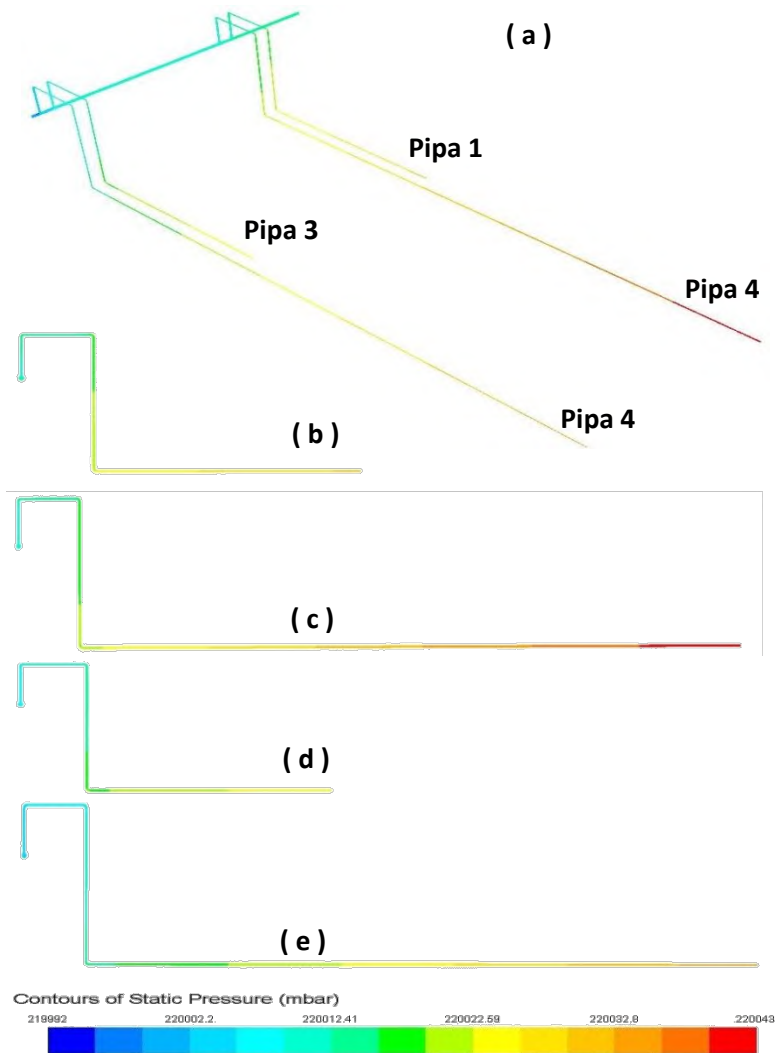
4.4.4 Variasi Tekanan Outlet Header 220 barg

Variasi simulasi selanjutnya adalah tekanan pada *outlet header* sebesar 220 bar. Dengan kondisi tersebut, besarnya tekanan yang dihasilkan oleh masing – masing kompresor akan dapat diketahui dengan proses simulasi menggunakan *software*. Hasil simulasi yang berupa data kualitatif dapat diamati pada gambar 4.8. Data kualitatif berupa perubahan perubahan warna kontur pada gambar 4.8 menunjukkan fenomena perubahan

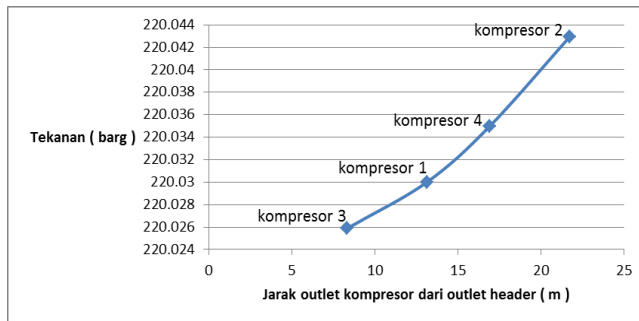
tekanan aliran CNG selama melewati pipeline. Secara kualitatif dapat diamati bahwa tekanan tertinggi dihasilkan oleh kompresor nomor 2, yaitu mencapai 220.033 – 220.043 barg yang ditunjukkan oleh kontur oranye sampai kemerahan. Dari gambar 4.8 juga dapat diamati bahwa kontur untuk semua pipa setelah discharge kompresor sampai pipa header terjadi gradasi warna, hal ini menunjukkan adanya perubahan tekanan sepanjang pipa tersebut. Pada pipa nomor 2, atau setelah discharge kompresor 2 paling banyak mengalami perubahan kontur warna, yaitu mulai warna merah saat di posisi discharge kompresor kemudian berubah menjadi kuning sampai kemudian menjadi warna hijau muda ketika mulai masuk pipa header. Hal ini menunjukkan bahwa pada pipa nomor 2 tersebut paling besar mengalami pressure drop.

Pada pipa header dapat dilihat bahwa kontur warna sepanjang header relatif sama, yaitu biru kehijauan. Hal ini menunjuk bahwa tekanan pada pipa header adalah sama, baik itu dekat ataupun jauh dari *outlet header*.

Untuk mengetahui perbedaan tekanan secara kuantitatif antara kompresor 1, 2, 3, dan 4 ketika tekanan outlet header bernilai 220 barg dapat dilihat pada gambar 4.8 . Pada grafik tersebut dapat dilihat besarnya tekanan pada setiap kompresor , fungsi posisi atau jarak kompresor terhadap outlet dari header. Dari grafik pada gambar 4.8 terlihat bahwa semakin jauh posisi kompresor dari outlet header, semakin besar tekanan yang dihasilkan oleh kompresor. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.2 , bahwa jarak masing – masing kompresor dari yang terjauh secara berurutan adalah kompresor 2, 4, 1, dan 3. Jarak kompresor 2 dari outlet header adalah 21.73 meter. Sedangkan kompresor 4 berjarak 16.93 meter, kompresor 1 berjarak 13.14 meter dan kompresor 3 berjarak 8.34 meter dari outlet header.



Gambar 4.8 Kontur tekanan aliran *compressed natural gas* sepanjang pipeline **a)** Pandangan isometric **b)** Pandangan sampling pipa 1 **c)** Pandangan sampling pipa 2 **d)** Pandangan sampling pipa 3 **e)** Pandangan sampling pipa 4



Gambar 4.9 Grafik tekanan *discharge* kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan *outlet header* bernilai 220 barg

Dengan demikian, kompresor 2 menghasilkan tekanan paling besar jika dibandingkan dengan kompresor lainnya dikarenakan posisi dari kompresor 2 adalah terjauh dari outlet header. Tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 2 adalah sebesar 220.042 barg. Selanjutnya tekanan kompresor terbesar setelah kompresor nomor 2 adalah kompresor 4, yang berjarak 16.93 meter dari outlet header. Tekanan yang dihasilkan dari kompresor 4 adalah sebesar 220.035 barg. Sedangkan tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 1 adalah sebesar 220.030 barg. Kompresor 3, yang merupakan kompresor paling dekat dengan outlet header, menghasilkan tekanan 220.025 barg. Tekanan tersebut merupakan tekanan terkecil dibanding tekanan yang dihasilkan oleh kompresor lainnya.

Dengan memperhatikan grafik pada gambar 4.9, besar tekanan yang terjadi pada masing – masing kompresor dapat diketahui. Dengan demikian, besarnya pressure drop yang terjadi selama aliran melewati *pipeline* juga dapat dihitung. Untuk lebih jelasnya, besar pressure drop yang terjadi dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Perbandingan besar *pressure drop* yang terjadi pada masing – masing *discharge* kompresor

	Kompresor 1	Kompresor 2	Kompresor 3	Kompresor 4
Jarak dari inlet tube skid (m)	13.14	21.73	8.34	16.93
Tekanan yang dihasilkan (barg)	220.03	220.042	220.026	220.035
Besar Pressure Drop (mbarg / m)	2.28	1.98	3.1	2.07

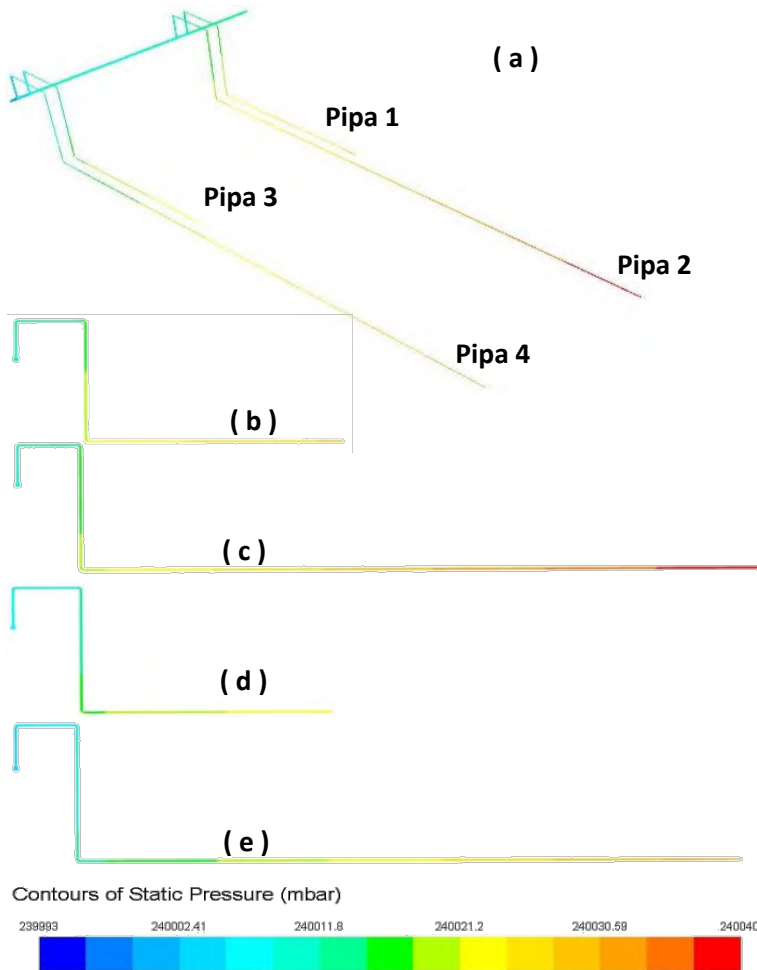
4.4.5 Variasi Tekanan Outlet Header 240 barg

Pengamatan perubahan tekanan pada aliran CNG selanjutnya adalah untuk variasi tekanan *inlet tube skid* 240 bar. Fenomena perubahan tekanan aliran CNG selama melewati pipeline dapat diamati pada gambar 4.10 dengan memperhatikan perubahan kontur warna pada domain. Secara kualitatif dapat diamati bahwa tekanan tertinggi dihasilkan oleh kompresor nomor 2, yaitu mencapai 240.031 – 240.040 barg yang ditunjukkan oleh kontur oranye sampai kemerahan. Dari gambar 4.10 juga dapat diamati bahwa kontur untuk semua pipa setelah *discharge* kompresor sampai pipa header terjadi gradasi warna, hal ini menunjukkan adanya perubahan tekanan sepanjang pipa tersebut. Pada pipa nomor 2, atau setelah *discharge* kompresor 2 paling banyak mengalami perubahan kontur warna, yaitu mulai warna merah saat di posisi *discharge* kompresor kemudian berubah menjadi kuning sampai kemudian menjadi warna hijau muda ketika mulai masuk pipa header. Hal ini menunjukkan bahwa pada pipa nomor 2 tersebut paling besar mengalami *pressure drop*.

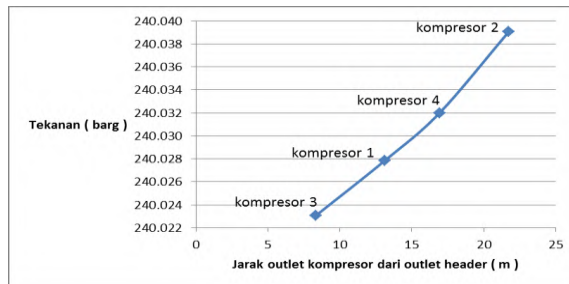
Kontur warna sepanjang header relatif sama, yaitu biru kehijauan. Hal ini menunjuk bahwa tekanan pada pipa header adalah sama, baik itu dekat ataupun jauh dari outlet header. Untuk mengetahui perbedaan tekanan secara kuantitatif antara kompresor 1, 2, 3, dan 4 ketika tekanan outlet header bernilai 240 barg dapat dilihat pada grafik di gambar 4.11 . Pada grafik tersebut dapat dilihat besarnya tekanan pada setiap kompresor , fungsi posisi atau jarak kompresor terhadap outlet dari header. Dari grafik pada gambar 4.11 terlihat bahwa semakin jauh posisi

kompresor dari outlet dari header, semakin besar tekanan yang dihasilkan oleh kompresor. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.2 , bahwa jarak masing – masing kompresor dari yang terjauh secara berturut - turut adalah kompresor 2, 4, 1, dan 3. Jarak kompresor 2 dari outlet header adalah 21.73 meter. Sedangkan kompresor 4 berjarak 16.93 meter, kompresor 1 berjarak 13.14 meter dan kompresor 3 berjarak 8.34 meter dari outlet header.

Dengan demikian, kompresor 2 menghasilkan tekanan paling besar jika dibandingkan dengan kompresor lainnya dikarenakan posisi dari kompresor 2 adalah terjauh dari inlet tube skid maka. Tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 2 adalah sebesar 240.039 barg. Selanjutnya tekanan kompresor terbesar setelah kompresor nomor 2 adalah kompresor 4 , yang berjarak 16.93 meter dari outlet header. Tekanan yang dihasilkan dari kompresor 4 adalah sebesar 240.032 barg. Sedangkan tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 1 adalah sebesar 240.027 barg. Kompresor 3, yang merupakan kompresor paling dekat dengan outlet header, menghasilkan tekanan 240.023 barg. Tekanan tersebut merupakan tekanan terkecil dibanding tekanan yang dihasilkan oleh kompresor lainnya.



Gambar 4.10 Kontur tekanan aliran *compressed natural gas* sepanjang *pipeline* **a)** Pandangan *isometric* **b)** Pandangan samping pipa 1 **c)** Pandangan samping pipa 2 **d)** Pandangan samping pipa 3 **e)** Pandangan samping pipa 4



Gambar 4.11 Grafik tekanan *discharge* kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan *outlet header* bernilai 240 barg

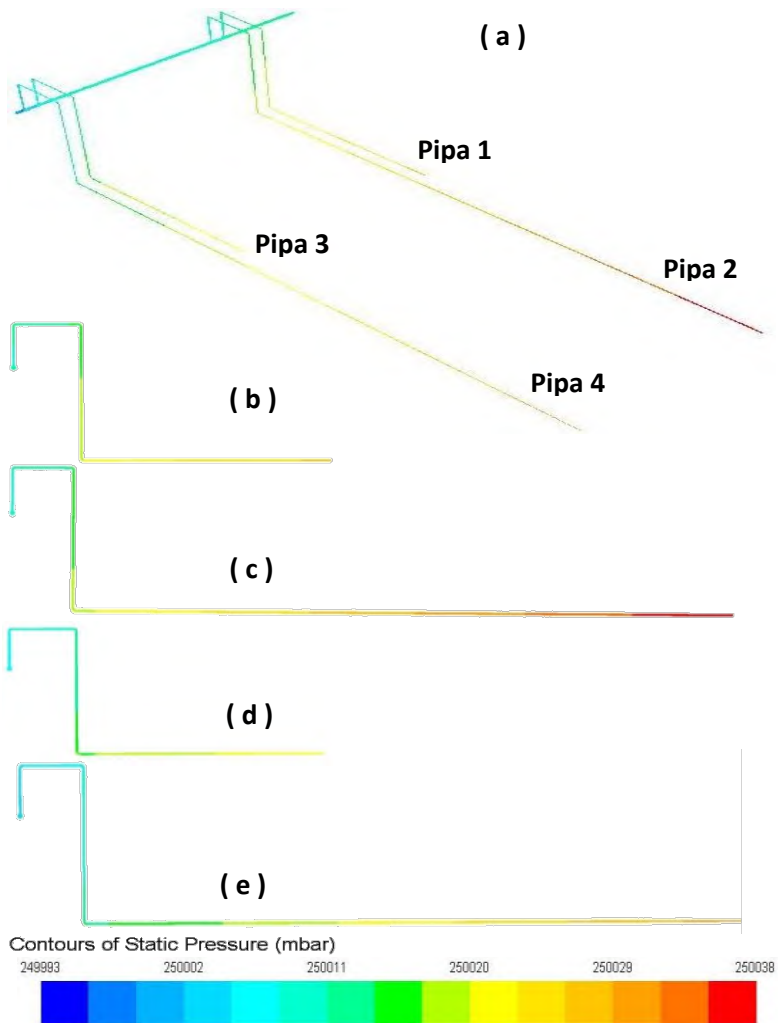
Dengan memperhatikan grafik pada gambar 4.11, besar tekanan yang terjadi pada masing – masing kompresor dapat diketahui. Dengan demikian, besarnya *pressure drop* yang terjadi selama aliran melewati *pipeline* juga dapat dihitung. Untuk lebih jelasnya, besar *pressure drop* yang terjadi dapat dilihat pada tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Perbandingan besar *pressure drop* yang terjadi pada masing – masing *discharge* kompresor

	Kompresor 1	Kompresor 2	Kompresor 3	Kompresor 4
Jarak dari inlet tube skid (m)	13.14	21.73	8.34	16.93
Tekanan yang dihasilkan (barg)	240.028	240.039	240.023	240.032
Besar Pressure Drop (mbarg / m)	2.12	1.79	2.77	1.89

4.4.6 Variasi Tekanan Inlet Tube Skid 250 barg

Pengamatan perubahan tekanan pada aliran CNG selanjutnya adalah untuk variasi tekanan *outlet header* 250 barg. Fenomena perubahan tekanan aliran CNG selama melewati *pipeline* dapat diamati pada gambar 4.12 dengan memperhatikan perubahan kontur warna pada domain. Secara kualitatif dapat diamati bahwa tekanan tertinggi dihasilkan oleh kompresor nomor 2, yaitu mencapai 250.029 – 250.038 barg yang ditunjukkan oleh kontur oranye sampai kemerahan.



Gambar 4.12 Kontur tekanan aliran *compressed natural gas* sepanjang *pipeline a*) Pandangan *isometric b*) Pandangan samping pipa 1 *c*) Pandangan samping pipa 2 *d*) Pandangan samping pipa 3 *e*) Pandangan samping pipa 4

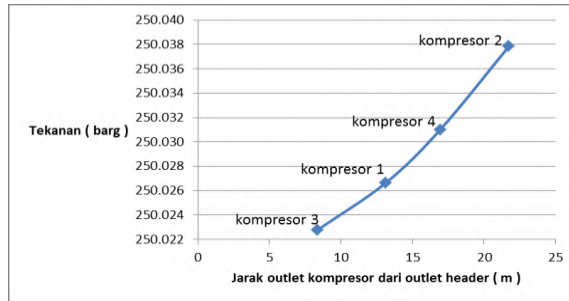
Dari gambar 4.12 juga dapat diamati bahwa kontur untuk semua pipa setelah discharge kompresor sampai pipa header terjadi gradasi warna, hal ini menunjukkan adanya perubahan tekanan sepanjang pipa tersebut. Pada pipa nomor 2, atau setelah discharge kompresor 2 paling banyak mengalami perubahan kontur warna, yaitu mulai warna merah saat di posisi discharge kompresor kemudian berubah menjadi kuning sampai kemudian menjadi warna hijau muda ketika mulai masuk pipa header. Hal ini menunjukkan bahwa pada pipa nomor 2 tersebut paling besar mengalami pressure drop.

Pada pipa header dapat dilihat bahwa kontur warna sepanjang header relatif sama, yaitu biru kehijauan. Hal ini menunjuk bahwa tekanan pada pipa header adalah sama, baik itu dekat ataupun jauh dari outlet header.

Untuk mengetahui perbedaan tekanan secara kuantitatif antara kompresor 1, 2, 3, dan 4 ketika tekanan outlet header bernilai 250 barg dapat dilihat pada grafik di gambar 4.13 . Pada grafik tersebut dapat dilihat besarnya tekanan pada setiap kompresor , fungsi posisi atau jarak kompresor dari outlet dari header. Dari grafik pada gambar 4.13 terlihat bahwa semakin jauh posisi kompresor *outlet header*, semakin besar tekanan yang dihasilkan oleh kompresor. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.2 , bahwa jarak masing – masing kompresor dari yang terjauh secara berturut - turut adalah kompresor 2, 4, 1, dan 3. Jarak kompresor 2 dari outlet header adalah 21.73 meter. Sedangkan kompresor 4 berjarak 16.93 meter, kompresor 1 berjarak 13.14 meter dan kompresor 3 berjarak 8.34 meter dari outlet header.

Dengan demikian, kompresor 2 menghasilkan tekanan paling besar jika dibandingkan dengan kompresor lainnya dikarenakan posisi dari kompresor 2 adalah terjauh dari outlet header. Tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 2 adalah sebesar 250.038 barg. Selanjutnya tekanan kompresor terbesar setelah kompresor nomor 2 adalah kompresor 4 , yang berjarak 16.93 meter dari outlet header. Tekanan yang dihasilkan dari kompresor

4 adalah sebesar 250.031 barg. Sedangkan tekanan yang dihasilkan oleh kompresor 1 adalah sebesar 250.027 barg. Kompresor 3, yang merupakan kompresor paling dekat dengan outlet header, menghasilkan tekanan 250.023 barg. Tekanan tersebut merupakan tekanan terkecil dibanding tekanan yang dihasilkan oleh kompresor lainnya



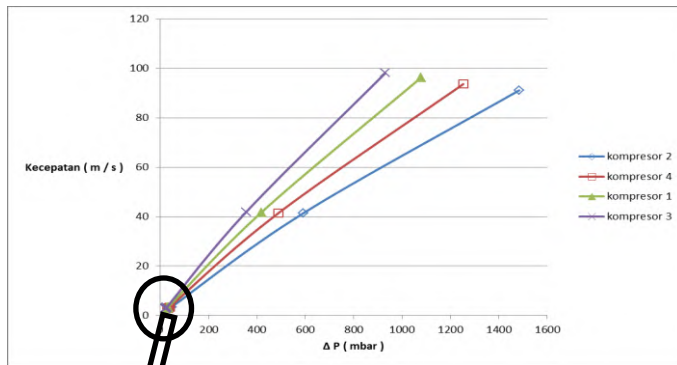
Gambar 4.13 Grafik tekanan *discharge* kompresor fungsi jarak kompresor saat tekanan *outlet header* bernilai 250 barg

Dengan memperhatikan grafik pada gambar 4.13, besar tekanan yang terjadi pada masing – masing kompresor dapat diketahui. Dengan demikian, besarnya *pressure drop* yang terjadi selama aliran melewati *pipeline* juga dapat dihitung. Untuk lebih jelasnya, besar *pressure drop* yang terjadi dapat dilihat pada tabel 4.8 berikut.

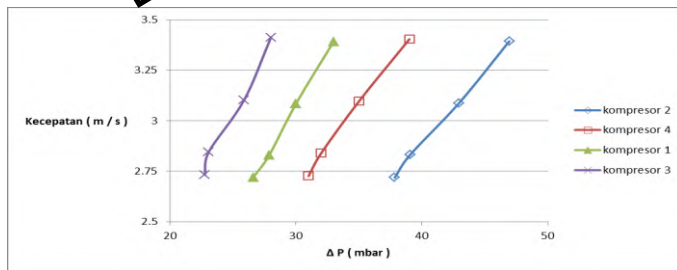
Tabel 4.8 Perbandingan besar *pressure drop* yang terjadi pada masing – masing *discharge* kompresor

	Kompresor 1	Kompresor 2	Kompresor 3	Kompresor 4
Jarak dari inlet tube skid (m)	13.14	21.73	8.34	16.93
Tekanan yang dihasilkan (barg)	250.027	250.038	250.023	250.031
Besar Pressure Drop (mbarg / m)	2.03	1.74	2.73	1.83

4.5 Analisa Perubahan Kecepatan Aliran



(a)



(b)

Gambar 4.14

- a) Grafik kecepatan aliran gas fungsi perubahan *pressure drop*
- b) Perbesaran grafik kecepatan aliran gas fungsi perubahan *pressure drop* untuk tekanan outlet header 200 barg, 220 barg, 240 barg, 250 barg.

Grafik di atas menampilkan data mengenai perubahan kecepatan aliran gas ketika keluar kompresor berdasarkan *pressure drop* yang terjadi pada aliran. Dari grafik tersebut dapat diamati bagaimana hubungan kecepatan aliran terhadap *pressure drop*. Peningkatan *pressure drop* pada aliran sebanding dengan

peningkatan kecepatan aliran. Jadi semakin besar *pressure drop* yang terjadi pada aliran gas, kecepatan aliran akan semakin cepat.

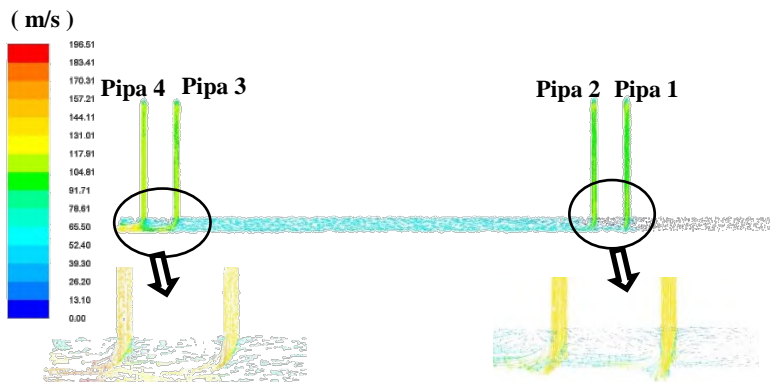
Grafik berwarna biru menggambarkan perubahan kecepatan aliran yang dihasilkan oleh kompresor nomor 2 berdasarkan peningkatan *pressure drop* yang terjadi. Ketika *pressure drop* yang terjadi pada aliran sebesar 37.838 mbar, kecepatan aliran gas yang dihasilkan oleh kompresor nomor 2 adalah sebesar 2.718 m/s. Pada saat *pressure drop* aliran meningkat menjadi 591.035 mbar, kecepatan aliran gas juga mengalami peningkatan menjadi 41.328 m/s. Hal tersebut terus berlanjut seiring dengan peningkatan *pressure drop* pada aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 2. *Pressure drop* terbesar yang terjadi pada aliran adalah sebesar 1484.265 mbar. Pada kondisi tersebut kecepatan aliran yang dihasilkan oleh kompresor nomor 2 juga meningkat menjadi 91.098 m/s.

Pembahasan selanjutnya adalah pada grafik berwarna merah, yang menggambarkan perubahan kecepatan pada aliran yang dihasilkan oleh kompresor nomor 4 sebagai fungsi dari *pressure drop*. Trendline yang terbentuk dari grafik tersebut sama dengan grafik warna biru, di mana terjadi peningkatan kecepatan aliran yang dihasilkan oleh kompresor nomor 4 seiring dengan peningkatan *pressure drop* yang terjadi. Ketika *pressure drop* yang terjadi pada aliran sebesar 31 mbar, kecepatan aliran gas yang dihasilkan oleh kompresor nomor 4 adalah sebesar 2.726 m/s. Pada saat *pressure drop* aliran meningkat menjadi 488.721 mbar, kecepatan aliran gas juga mengalami peningkatan menjadi 41.328 m/s. Hal tersebut terus berlanjut seiring dengan peningkatan *pressure drop* pada aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 4. *Pressure drop* terbesar yang terjadi pada aliran adalah sebesar 1252.868 mbar. Pada kondisi tersebut kecepatan aliran yang dihasilkan oleh kompresor nomor 4 juga meningkat menjadi 93.610 m/s.

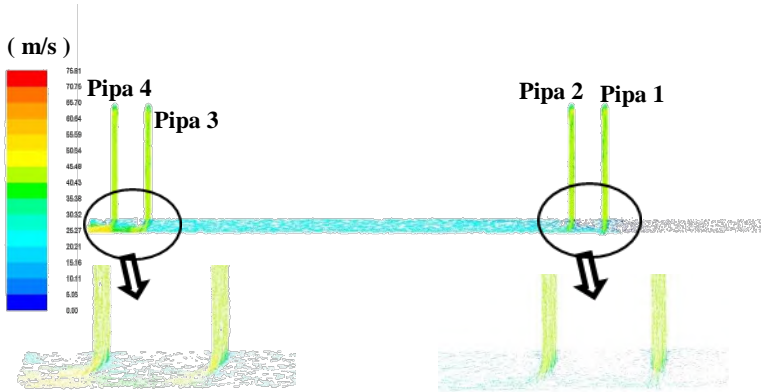
Untuk kompresor nomor 1 dan 3, yaitu grafik dengan warna hijau dan ungu juga memiliki trendline yang sama dengan grafik perubahan kecepatan aliran yang dihasilkan oleh

kompresor nomor 2 dan 4. Jika dilihat pada grafik pada gambar 4.14, kecepatan fluida akan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya besar *pressure drop* yang terjadi. Jika ditinjau secara teoritis, hal tersebut dikarenakan kecepatan fluida berbanding terbalik dengan tekanan pada fluida. Jika tekanan fluida semakin tinggi, maka kecepatan fluida akan semakin rendah. Berdasarkan persamaan *pressure drop* aliran di dalam pipa, yaitu $P = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu V}{D}$, terlihat bahwa kecepatan fluida berbanding lurus dengan *pressure drop*. Peningkatan kecepatan fluida akan diikuti dengan peningkatan besarnya *pressure drop* fluida.

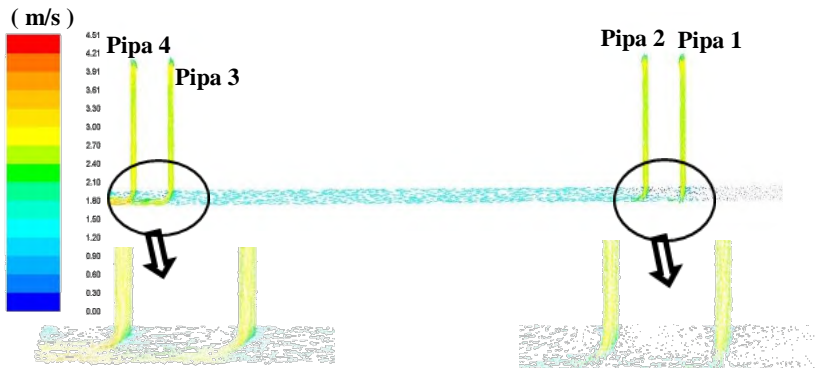
4.6 Analisa Visualisasi Vektor Kecepatan dari Aliran Ketika Memasuki *Header*



Gambar 4.15 Visualisai vektor kecepatan aliran di *header* ketika tekanan *outlet header* 5 barg



Gambar 4.16 Visualisai vektor kecepatan aliran di *header* ketika tekanan *outlet header* 15 barg



Gambar 4.17 Visualisai vektor kecepatan aliran di *header* ketika tekanan *outlet header* 250 barg

Gambar 4.15, 4.17, 4.18 menunjukkan bagaimana pola aliran *compressed natural gas* ketika mulai memasuki *header*. Dari ketiga gambar tersebut dapat diamati bahwa terjadi olakan-olakan dan *backflow* pada aliran. Olakan-olakan pada aliran

terjadi di bagian header yang terletak di antara pipa 1 dan 2 serta di antara pipa 3 dan 4. Sedangkan *backflow* paling banyak terjadi pada aliran setelah keluar dari pipa 1 dan 2.

Jika diperhatikan lebih teliti, dari ketiga gambar tersebut terlihat bahwa olakan-olakan aliran lebih banyak terjadi pada bagian header di antara pipa 1 dan 2, dibandingkan dengan bagian header di antara pipa 3 dan 4. Hal ini menyebabkan aliran mengalami perlambatan pada bagian *header* tersebut. Akibat dari kondisi ini, tekanan di bagian tersebut semakin tinggi. Sehingga diperlukan tekanan yang lebih besar dari aliran yang masuk ke *header* melewati pipa 1 dan 2. Konsekuensinya daya yang diperlukan oleh kompresor 1 dan 2 juga akan meningkat.

Dari gambar 4.15, 4.16, 4.17 jika kita bandingkan, dapat kita amati bahwa jumlah olakan-olakan pada aliran semakin sedikit, seiring dengan peningkatan tekanan pada *outlet header*. Hal ini menandakan bahwa aliran dapat mengalir dengan mudah, karena tekanan aliran masih relatif tinggi. Jadi dapat dinyatakan bahwa *pressure drop* yang terjadi pada aliran juga semakin mengecil seiring dengan kenaikan tekanan yang dihasilkan oleh kompresor. Fenomena tersebut sesuai dengan hasil kuantitatif pada grafik di gambar 4.1.

4.7 Pengaruh Perubahan Tekanan Aliran Terhadap Kecepatan Aliran di *Outlet Header*

Grafik pada gambar 4.18 menunjukkan bagaimana pengaruh *pressure drop* pada aliran natural gas yang dikompresi oleh masing masing kompresor terhadap kecepatan aliran di sisi outlet header. Kecepatan aliran di outlet header dipengaruhi oleh besarnya *pressure drop* yang terjadi pada setiap aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 1, 2, 3, dan 4. Dari grafik di atas dilihat berapa *pressure drop* yang terjadi pada aliran ketika kecepatan outlet header tertentu.

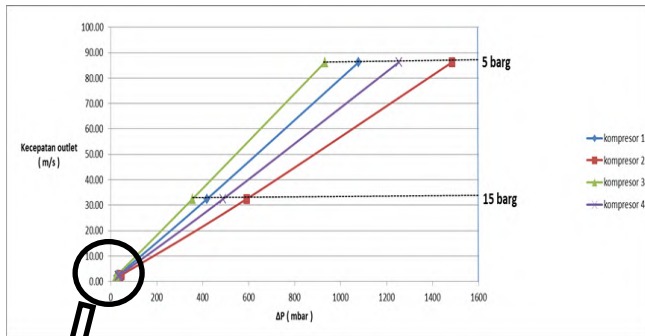
Ketika tekanan pada outlet header bernilai 5 barg, *pressure drop* yang terjadi pada aliran yang dikompresi oleh kompresi nomor 1 adalah sebesar 1077.73 mbar. Sedangkan

untuk aliran natural gas yang dikompresi oleh kompresor nomor 2 mengalami pressure drop sebesar 1484.27 mbar. Untuk aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 3 dan 4, pressure drop yang terjadi secara berturut turut adalah 931.298 mbar dan 1252.868 mbar. Dengan kondisi pressure drop yang berbeda – beda pada masing – masing aliran yang dikompresi oleh keempat kompresor, kecepatan aliran natural gas ketika mencapai outlet header adalah 86.25 m/s. Pengamatan selanjutnya adalah ketika kondisi tekanan outlet header bernilai 15 barg, pressure drop yang dialami aliran yang dikompresi oleh kompresor 1, 2, 3, dan 4 adalah 418.48 mbar, 591.04 mbar, 355.43 mbar, 488.72 mbar. Pada kondisi tersebut kecepatan aliran natural gas di outlet header adalah 32.49 m/s. Seiring dengan naiknya tekanan pada outlet header, terjadi penurunan pada kecepatan aliran di outlet

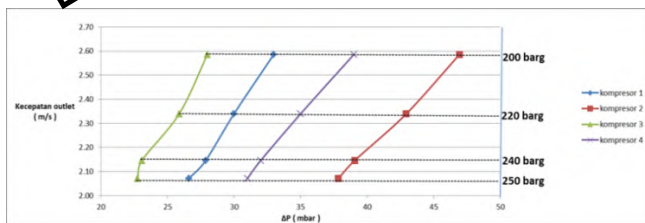
Pressure drop yang terjadi pada aliran juga semakin mengecil. Hal ini dapat kita lihat pada grafik ketika tekanan outlet header sebesar 250 barg. Kondisi tersebut merupakan kondisi tekanan terbesar. Pada kondisi tersebut, pressure drop yang terjadi pada aliran natural gas yang dikompresi oleh keempat kompresor merupakan pressure drop terkecil jika dibandingkan kondisi yang lain. Kecepatan aliran natural gas di outlet header juga merupakan kecepatan terendah jika dibandingkan pada kondisi tekanan outlet yang lain, yaitu sebesar 2.07 m/s. *Pressure drop* yang dialami aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 4 bernilai 31 mbar. Untuk aliran natural gas dari *discharge* kompresor nomor 3, pressure dropnya sebesar 22.76 mbar. Sedangkan untuk aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 1 dan 2, secara berturut turut pressure dropnya sebesar 26.6 mbar dan 37.84 mbar.

Jika dilihat pada grafik pada gambar 4.18, kecepatan aliran *natural gas* di *outlet header* akan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya besar *pressure drop* yang terjadi. Jika ditinjau secara teoritis, hal tersebut dikarenakan kecepatan aliran natural gas berbanding terbalik dengan tekanan pada natural gas. Jika tekanan pada aliran semakin tinggi, maka

kecepatan aliran akan semakin rendah. Berdasarkan persamaan pressure drop aliran di dalam pipa, yaitu $\Delta P = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu V}{D}$, terlihat bahwa kecepatan fluida berbanding lurus dengan pressure drop. Peningkatan kecepatan aliran natural gas ketika di outlet dipengaruhi oleh besarnya pressure drop yang terjadi pada aliran.



(a)



(b)

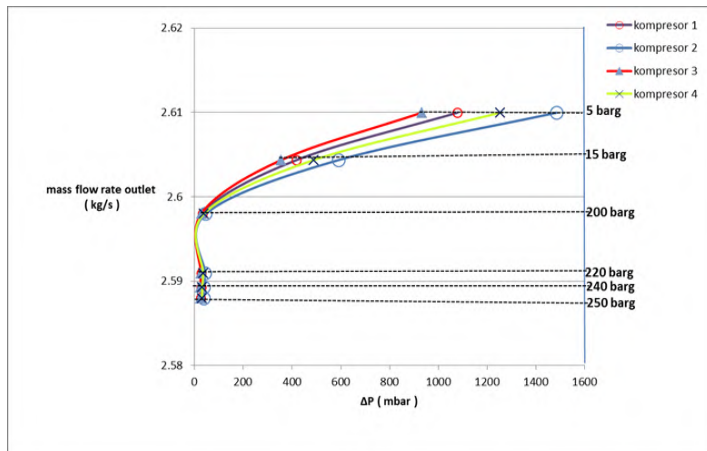
Gambar 4.18

a) Grafik kecepatan aliran gas di *outlet header* fungsi perubahan *pressure drop*

b) Perbesaran grafik kecepatan aliran gas di *outlet header* fungsi perubahan *pressure drop* untuk tekanan outlet header 200 barg, 220 barg, 240 barg, 250 barg.

4.8 Pengaruh Perubahan Tekanan Aliran Terhadap *Mass Flow Rate* di Outlet Header

Grafik pada gambar 4.16 menunjukkan bagaimana pengaruh pressure drop yang terjadi pada aliran compressed natural gas terhadap mass flow rate yang terjadi di outlet header. Dari grafik dapat diamati bahwa ketika mass flow rate aliran di outlet header bernilai tertentu, aliran natural gas yang terkompresi mengalami pressure drop yang berbeda – beda sesuai dengan jarak kompresor yang mengompresi aliran natural gas tersebut. Pada semua variasi tekanan outlet header, pressure drop terbesar terjadi pada aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 2, kemudian diikuti oleh kompresor nomor 4, 1, dan 3.



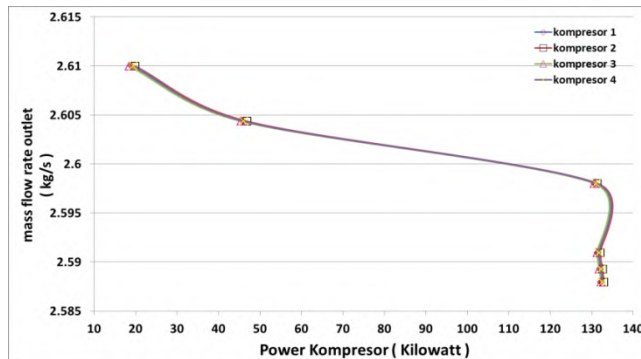
Gambar 4.19 Grafik *mass flow rate* aliran gas fungsi *pressure drop* yang terjadi pada aliran

Pada saat tekanan outlet header bernilai 5 barg, pressure drop yang terjadi pada aliran natural gas yang dikompresi oleh kompresor nomor 1 adalah sebesar 1077.73 mbar. Sedangkan untuk kompresor nomor 2, 3, dan 4 nilai pressure drop yang terjadi adalah sebesar 1484.27 mbar, 931.298 mbar, 1252.868

mbar. Pada kondisi ini mass flow rate dari compressed natural gas di outlet header bernilai 2.610 kg/s. Selanjutnya dapat kita amati pada kondisi tekanan outlet header 15 barg, pressure drop yang terjadi pada aliran semakin mengecil jika dibandingkan dengan kondisi tekanan outlet header 5 barg. Pada aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 1 pressure drop yang terjadi adalah 418.48 mbar. Pada kondisi tekanan outlet header yang sama, pressure drop yang dikompresi oleh kompresor nomor 2 adalah sebesar 591.03 mbar. Sedangkan untuk aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 3 dan 4, mengalami pressure drop sebesar 355.42 mbar dan 488.72 mbar. Dengan kondisi pressure drop yang berbeda – beda tersebut, mass flow rate yang terjadi di outlet header adalah sebesar 2.604 kg/s. Pada kondisi tekanan outlet header terbesar yaitu 250 barg, pressure drop yang terjadi pada aliran compressed natural gas adalah yang terkecil. Pada kondisi tersebut pressure drop terbesar terjadi pada aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 2, yaitu sebesar 37.84 mbar. Untuk aliran yang dikompresi oleh kompresor nomor 1, 3, dan 4, pressure drop yang terjadi secara berurutan adalah 26.6 mbar, 22.76 mbar, 31 mbar. Laju aliran massa di outlet header adalah sebesar 2.587 kg/s.

Jika dilihat pada grafik di atas, mass flow rate natural gas di outlet header akan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya besar pressure drop yang terjadi. Jika ditinjau secara teoritis, hal tersebut dikarenakan mass flow rate merupakan fungsi dari kecepatan. Sedangkan hubungan antara kecepatan dan pressure drop adalah sesuai dengan persamaan yaitu $\Delta P = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu V}{D}$, terlihat bahwa kecepatan fluida berbanding lurus dengan pressure drop. Hal ini mengakibatkan mass flow rate juga akan mengalami peningkatan sesuai dengan naiknya pressure drop aliran compressed natural gas.

4.9 Perhitungan Daya Kompresor



Gambar 4.20 Grafik daya yang diperlukan masing - masing kompresor

Grafik di atas menunjukkan besarnya daya yang diperlukan oleh setiap kompresor untuk semua variasi kondisi tekanan outlet agar dihasilkan mass flow rate tertentu di outlet header. Dari grafik ini terlihat bahwa untuk semua variasi tekanan outlet header, kompresor nomor 2 selalu membutuhkan daya terbesar, kemudian diikuti oleh kompresor nomor 4, 1, dan 3. Hal ini dapat terjadi karena jarak kompresor nomor 2 dari outlet header merupakan jarak terjauh jika dibandingkan dengan kompresor yang lain.

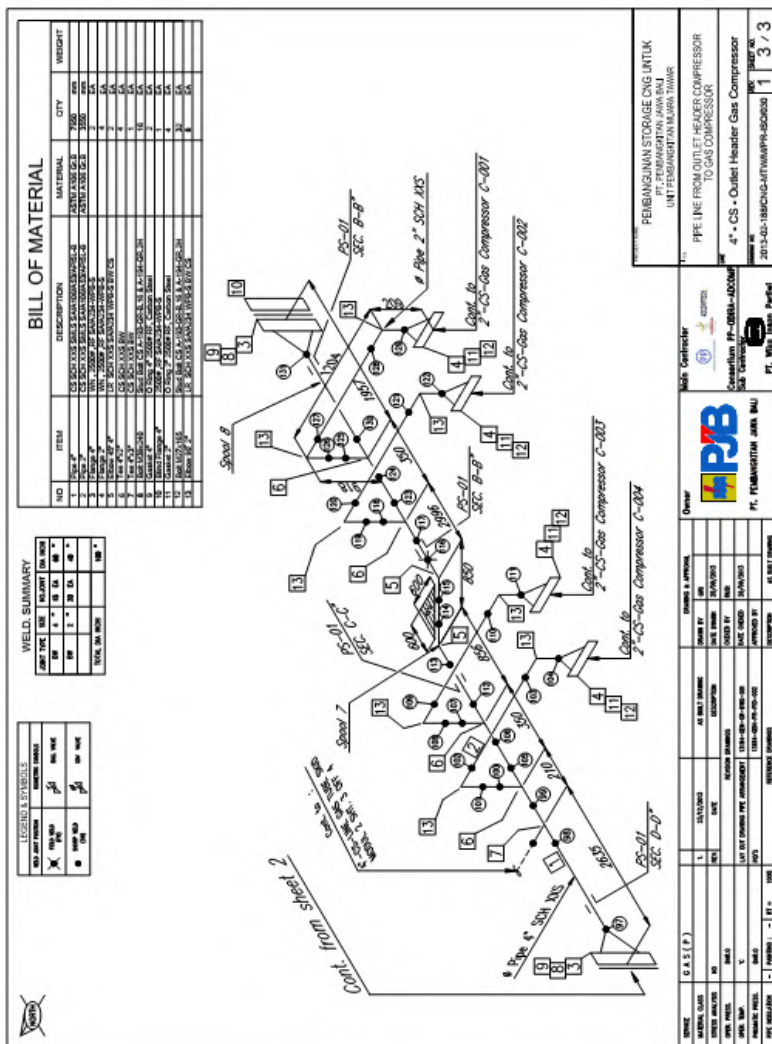
Dari grafik dapat diamati bahwa agar dihasilkan mass flow rate 2.61 kg/s pada tekanan outlet header sebesar 5 barg, daya yang diperlukan oleh kompresor nomor 1 adalah 18.96 KW. Kompresor nomor 2 yang merupakan kompresor terjauh dari outlet header memerlukan daya terbesar yaitu sebesar 19.87 KW. Sedangkan untuk kompresor nomor 3 dan 4 memerlukan daya sebesar 18.45 KW dan 19.48 KW. Ketika tekanan outlet header bernilai 15 barg, agar laju aliran massa dari natural gas di outlet header bernilai 2.60 kg/s maka daya yang diperlukan oleh kompresor 1, 2, 3, dan 4 secara berurutan adalah 45.79 KW, 46.81 KW, 45.40 KW, dan 46.06 KW. Dari trendline grafik pada

gambar 4.17 dapat dilihat bahwa peningkatan daya yang diperlukan kompresor berbanding terbalik dengan mass flow rate di outlet header. Pada kondisi tekanan outlet header tertinggi, yaitu 250 barg, daya yang diperlukan oleh kompresor justru lebih besar. Dengan daya terbesar mencapai 132.84 KW. Daya tersebut merupakan daya yang diperlukan oleh kompresor nomor 2. Sedangkan daya terbesar kedua diperlukan oleh kompresor nomor 4, dengan kebutuhan daya mencapai 132.57 KW. Untuk kompresor nomor 1 dan 3, daya yang diperlukan adalah sebesar 132.19 KW dan 132.26 KW. Dengan kebutuhan daya yang besar tersebut, mass flow rate di outlet header justru paling kecil jika dibandingkan kondisi kondisi lain. Nilai mass flow rate hanya sebesar 2.587 kg/s.

Secara teoritis *trendline* dari grafik ini sudah sesuai dengan teori. Daya kompresor dapat dihitung dengan persamaan $Power = Q (P_{discharge} - P_{suction})$. Dengan menganggap *mass flow rate* di discharge kompresor konstan maka, power kompresor dipengaruhi oleh tekanan yang dihasilkan oleh kompresor dan tekanan natural gas sebelum masuk kompresor. Semakin besar selisih antara tekanan discharge dan suction kompresor, maka daya yang diperlukan oleh kompresor juga akan semakin besar. Untuk mass flow rate di outlet header, semakin tinggi tekanan di outlet header laju aliran massa akan semakin mengecil. Jadi meskipun daya yang diperlukan oleh kompresor semakin membesar, *mass flow rate* ketika mencapai outlet header justru akan mengecil.

LAMPIRAN

A. Isometric Outlet Header



[illegible]

[illegible]

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan proses simulasi berbasis Computational Fluid Dynamics pada aliran CNG melewati *pipeline* dengan variasi tekanan pada *outlet header* mulai dari 5 barg, 15 barg, 200 barg, 220 barg, 240 barg, 250 barg, diperoleh beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Tekanan yang dihasilkan oleh kompresor berbanding lurus terhadap jarak kompresor tersebut dari *outlet header*. Semakin jauh posisi kompresor dari *outlet header*, semakin besar pula tekanan yang dihasilkan oleh kompresor. Berdasarkan tekanan yang dihasilkan oleh kompresor, urutan kompresor dimulai dari tekanan yang tertinggi adalah kompresor nomor 2, kompresor nomor 4, kompresor nomor 1, kompresor nomor 3.
2. Besar *pressure drop* yang terjadi pada aliran gas berbanding lurus terhadap jarak kompresor. Semakin jauh kompresor dari *outlet header*, semakin besar *pressure drop* yang terjadi pada aliran gas. *Pressure drop* terbesar adalah 1484.27 mbarg, ketika tekanan *outlet header* bernilai 5 barg dan terjadi pada aliran gas yang dikompresi oleh kompresor nomor 2 dengan jarak 21.73 meter dari *outlet header*.
3. Besar *pressure drop* yang terjadi pada aliran berbanding terbalik dengan tekanan yang terjadi pada kompresor. Pada tekanan kompresor terendah yaitu 5.39 barg, *pressure drop* yang terjadi pada aliran adalah sebesar 931.29 mbarg. Sedangkan pada tekanan kompresor tertinggi yaitu 250.038 barg, *pressure drop* yang terjadi pada aliran gas justru lebih kecil yaitu 37.84 mbarg.
4. Peningkatan *pressure drop* pada aliran sebanding dengan kecepatan aliran ketika melewati *pipeline*. *Pressure drop* terendah yang terjadi pada aliran gas adalah 22.76 mbarg ketika tekanan yang dihasilkan oleh kompresor sebesar 250.022 barg dan pada kondisi tersebut kecepatan aliran gas melewati *pipeline* adalah

sebesar 2.73 m/s. Sedangkan ketika *pressure drop* yang terjadi pada aliran sebesar 1484.27 mbarg dan tekanan kompresor bernilai 6.48 barg, kecepatan aliran meningkat menjadi 91.098 m/s.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah dilakukan penelitian ini diantaranya :

1. Pemodelan seharusnya memodelkan 16 posisi kompresor sekaligus semua sehingga dapat diketahui apakah terdapat kesalahan dalam desain pipa.
2. Komposisi natural gas seharusnya juga perlu diperhatikan karena tiap - tiap sumur gas menghasilkan komposisi gas yang berbeda. Komposisi natural gas juga dapat mempengaruhi kinerja dari kompresor.
3. Analisa seharusnya juga dilakukan pada *suction* kompresor, karena jika tekanan pada *suction* kompresor tidak sesuai dengan spesifikasi kerja kompresor maka akan dapat menyebabkan kegagalan pada kompresor.
4. Proses simulasi direkomendasikan menggunakan *software* lain yang lebih mendukung desain *pipeline*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] **ANSYS FLUENT 14 Theory Guide**, ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsbrug, PA 15317, USA; 2011.
- [2] **ANSYS FLUENT 14 User's Guide**, ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsbrug, PA 15317, USA; 2011.
- [3] Burlutskiy, Evgeniy. *Numerical Analysis of Rapid Gas Decompression in Pure Nitrogen using 1D and 3D Transient Mathematical Models of Gas Flow in Pipes*. J World Academy of Science, Engineering, and Technology. Singapore 2012. Vol 6, No1.
- [4] Noorbehest, Nikan dan Ghaseminejad, Pedram *Numerical Simulation of The Transient Flow in Natural Gas Transmission Lines Using A Computational Fluid Dynamic Method*, American Journal of Applied Sciences, 10 (1) : 24-34, 2013.
- [5] Mokhatab, S., Poe, W.A., dan Speight, J.G. 2006. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. Oxford : Elsevier Inc.
- [6] Pritchard, J. Philip, H.N., dan Leylegian, C. John. 2011. *Fox and Mcdonald's Inroduction to Fluid Mechanics 8th edition*. John Wiley & Sons Inc.
- [7] Nayyar, L.N. 2000. *Piping Handbook 7th Edition*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [8] Menon, E. Shasi. 2005. *Gas Pipeline Hydraulics*. Taylor & Francis

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

RIWAYAT PENULIS



Ardian Puji Noviatmoko, akrab dipanggil Ardian, lahir di Tulungagung 22 November 1991, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Riwayat pendidikan penulis diawali dari TK Dharma Wanita Kauman tahun 1996-1998 dan dilanjutkan ke SDN 2 Kauman pada tahun 1998-2004. Jenjang pendidikan menengah di tempuh di SMPN 1 Kauman pada tahun 2004-2007 dan SMAN 1 Boyolangu pada tahun 2007-2010. Dengan motivasi kuat untuk meningkatkan ilmu pengetahuan dan derajat keluarga, penulis berhasil menempuh pendidikan di perguruan tinggi, tepatnya di jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya pada tahun 2010-2016.

Selama menimba ilmu di Teknik Mesin ITS, penulis juga aktif dalam berorganisasi. Tercatat penulis pernah berkecimpung di BEM ITS, JMMI ITS, dan UKM Sepakbola ITS. Dalam bidang akademik, penulis juga pernah menjadi grader dan asisten kelas beberapa mata kuliah, antara lain mekanika fluida 1, termodinamika 2 dan perpindahan panas.

Dengan adanya pengalaman dan ilmu pengetahuan yang telah diperoleh selama menimba ilmu keteknikan dan kehidupan di Teknik Mesin ITS, penulis berharap untuk dapat mengamalkan ilmu dan memberikan kontribusi positif bagi keluarga, agama, dan seluruh rakyat Indonesia. ***Khoirunnas Angfa'uhum Linnas.***
Kontak penulis : *ardian.puji@gmail.com*.